



**TUGAS AKHIR - TM 091585**

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK  
ALIRAN 3D MELALUI *BACKWARD FACING*  
*STEP* DENGAN PENAMBAHAN  
*DISTURBANCE BODY* PADA SISI *UPSTREAM***

DODY RAHMAD TUESA

NRP 2113 105 032

Dosen Pembimbing

Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

*JURUSAN TEKNIK MESIN*

*Fakultas Teknologi Industri*

*Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

Surabaya 2016



**FINAL PROJECT - TM 091585**

**NUMERICAL STUDY OF 3D FLOW  
CHARACTERISTIC THROUGH  
BACKWARD FACING STEP WITH  
ADDITION OF DISTURBANCE BODY ON  
THE UPSTREAM SIDE**

**DODY RAHMAD TUESA**

**NRP 2113 105 032**

Academic Supervisor

**Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.**

*MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT*

*Faculty of Industrial Technology*

*Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

**Surabaya 2016**

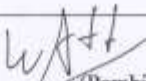



**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN 3D  
MELALUI *BACKWARD FACING STEP*  
DENGAN PENAMBAHAN *DISTURBANCE BODY*  
PADA SISI *UPSTREAM***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelara Sarjana Teknik Pada Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**DODY RAHMAD TUESA**  
NRP.2113105032

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir		
1.	<u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.</u> NIP. 197104051997021001	 .....(Pembimbing)
2.	<u>Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.</u> NIP. 196412281990031002	 .....(Penguji I)
3.	<u>Nur Ikhwani, ST., M.Eng.</u> NIP. 196709151995121001	 .....(Penguji II)
4.	<u>Aida Annisa Amin Daman, ST., MT.</u> NIP. 198907052015042005	 .....(Penguji III)

**SURABAYA**  
**2016**

# STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI BACKWARD FACING STEP DENGAN PENAMBAHAN DISTURBANCE BODY PADA SISI UPSTREAM

Nama Mahasiswa : Dody Rahmad Tuesa  
NRP : 2113105032  
Jurusan : Teknik Mesin  
Dosen pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

## Abstrak

Fenomena aliran *backward facing step* banyak ditemukan pada saluran-saluran fluida. Banyak penelitian tentang *backward facing step* yang dilakukan oleh peneliti untuk mengeksplor efek-efek yang terjadi dalam saluran yang mengalami ekspansi. Penelitian ini memfokuskan pada aliran yang melalui *backward facing step* dengan penambahan *disturbance body* pada sisi *upstream* berupa *circular bump*. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui karakteristik aliran yang melewati saluran ekspansi berupa fenomena jarak *reattachment*, profil kecepatan, koefisien gesek dan koefisien tekanan. Penelitian ini penting untuk dilakukan agar dapat meminimalisir kerugian-kerugian aliran yang terjadi pada saluran melebar.

Model uji yang akan diteliti dalam studi ini berupa saluran *backward facing step* (saluran ekspansi) dengan penambahan pengganggu pada sisi depan. Fluida yang mengalir adalah udara *incompressible, viscous, steady*, profil kecepatan *uniform* pada sisi *inlet*, nilai Reynold yang digunakan  $3.8 \times 10^4$  dengan variasi jarak pengganggu berupa *circular bump* pada sisi *upstream* ( $s = -0.58h, -1.02h, -1.47h, -2.07h$ ). Penelitian dilakukan dengan numerik 3D menggunakan program piranti lunak *Computation Fluid Dynamic* (CFD) dengan model turbulensi *k- $\epsilon$  Realizable* dan jenis *discretization* yang digunakan adalah *second order*.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah dengan penambahan bodi pengganggu pada sisi *upstream* berupa *circular bump* dengan variasi jarak ( $s = -0.58h, -1.02h, -1.47h, 2.07h$ ) dapat mengurangi jarak titik *reattachment* pada aliran yang mengalir pada area yang mengalami perluasan penampang. Variasi jarak bump  $s = -1.02h$  memperlihatkan hasil yang lebih baik dengan jarak titik *reattachment* yang paling pendek dari pada variasi jarak bodi pengganggu yang lain. Pengurangan panjang *reattachment* sekitar 10 % dari benda uji tanpa menggunakan bump. Penambahan bodi pengganggu dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan benda uji. Harga *pressure drop* pada variasi jarak  $s = -1.02h$  juga menunjukkan selisih penurunan yang tidak terlalu signifikan dari pada variasi yang lain.

**Kata kunci :** *backward facing step, circular bump, disturbance body, titik reattachment.*

# NUMERICAL STUDY OF 3D FLOW CHARACTERISTIC THROUGH BACKWARD FACING STEP WITH ADDITION OF DISTURBANCE BODY ON THE UPSTREAM SIDE

Name of student : Dody Rahmad Tuesa  
NRP : 2113105032  
Major : Teknik Mesin  
Supervisor : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

## ***Abstract***

*Backward facing step flow are common phenomena in the fluid channels. Many studies on Backward facing step undertaken by researchers to explore the effects of Backward facing step in the expansion channel. This study focused on the flow through the back facing step with the addition of disturbance body on the upstream side such as circular bump. The study objective is to examine the characteristics of the flow through the expansion channel are reattachment distance, velocity profile, skin friction coefficient and pressure coefficients. The study is important in order to minimize losses that occurs in the widening channel flow.*

*Model researched in this study is backward facing step expansion channel with the addition of an disturbance body on the upstream. The fluid used is incompressible flow, viscous, steady, uniform velocity profile at the inlet side, used reynold number  $3.8 \times 10^4$  with the variation of disturbance (circular bump) distance from the step on the upstream side ( $s = -0.58h, -1.02h, -1.47h, -2.07h$ ). 3D numerical simulation was conducted by using Computation Fluid Dynamic (CFD) software with  $k-\epsilon$  realizableturbulence model and discrization type use second order.*

*The study concludes that the addition of disturbance body on the upstream side as a circular bump with distance variations of  $s = -0.58h, -1.02h, -1.47h$ , and  $2.07h$  will decrease reattachment point distance of the flowing fluid in the expanded*

*area of the channel. The bump's distance  $s = -1.02h$  yields the best result because it is the shortest then the other distance value, and decreases reattachment length about 10% lower then the reattachment length of model without bump. The addition of disturbance body decreases pressure drop which is occurred in the simulation. Pressure drop value of  $s = -1.02h$  does not show any differences with the other value.*

**Keyword : backward facing step, circular bump, disturbance body, reattachmen point.**

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Bilangan Reynolds .....	7
2.2 <i>Coefficient Of Pressure</i> .....	7
2.3 <i>Skin Friction Coefficient</i> .....	8
2.4 Aliran Didalam <i>Backward Facing Step</i> .....	8
2.4.1 Mekanisme terjadinya separasi .....	8
2.4.2 Aliran sekunder .....	9
2.4.3 Fenomena <i>Boundary layer</i> .....	9



2.4.4 Efek <i>boundary layer</i> turbulen terhadap separasi	13
2.5 Karakteristik Aliran Pada <i>Backward Facing Step</i> .....	13
2.6 Pengaruh Variasi Expansi Dan Variasi <i>Reynolds number</i> Pada <i>Backward Facing Step</i> .....	16
2.7 Pengaruh Bentuk <i>Bump</i> Terhadap Separasi.....	18
2.8 Pemodelan Numerik .....	20
2.8.1 <i>Computatation Fluid Dynamics</i> .....	20
2.8.2 Persamaan Dasar Dan Model Turbulen .....	21
2.8.3 Daerah Dekat Dinding ( <i>Near Wall Region</i> ) .....	23
<b>BAB III METODELOGI PENELITIAN .....</b>	<b>27</b>
3.1 Geometri <i>Backward Facing Step</i> .....	27
3.2 Metode Numerik .....	28
3.2.1 Tahap <i>Pre-Processing</i> .....	28
3.2.2 Tahap <i>Post-Processing</i> .....	30
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>37</b>
4.1 Analisa Aliran <i>Backward Facing Step</i> Tanpa <i>Circular Bump</i> .....	37
4.2 Analisa aliran <i>Backward Facing Step</i> Tanpa Dan Dengan Penambahan <i>Bump</i> .....	42
4.2.1 Panjang <i>Reattachment</i> .....	42
4.2.2 Distribusi Profil Kecepatan .....	44
4.2.3 Distribusi Intensitas Turbulensi .....	48

4.2.4 <i>Coefficient Friction</i> .....	52
4.2.5 <i>Coefficient Of Pressure</i> .....	53
4.2.6 <i>Shape Factor</i> .....	57
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	<b>59</b>
5.1 KESIMPULAN.....	59
5.2 SARAN .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>61</b>
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>63</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Separasi pada <i>step</i> .....	9
Gambar 2.2 <i>Viscous and inviscid region</i> .....	10
Gambar 2.3 Tebal lapisan batas ( $\delta$ ) .....	10
Gambar 2.4 (a) Profil kecepatan (b) Profil momentum fluks	11
Gambar 2.5 Grafik $C_f$ dan $C_p$ terhadap $x/h$ untuk perbedaan model turbulen dan <i>near wall treatment</i> $\alpha=0$ , $Re=38000$ ...	15
Gambar 2.6 Perbandingan distribusi kecepatan pada sudut aliran <i>backward facing step</i> yang diprediksi dengan model turbulen yang berbeda $\alpha=0^\circ$ , $Re=38000$ .....	16
Gambar 2.7 Grafik <i>reynolds number</i> terhadap panjang <i>reattachment</i> .....	17
Gambar 2.8 Perbandingan jarak <i>reattachment</i> dengan perbedaan ekspansi rasio .....	17
Gambar 2.9 Distribusi tekanan pada <i>bump</i> setengah lingkaran .....	18
Gambar 2.10 Distribusi kecepatan pada <i>bump</i> setengah lingkaran .....	19
Gambar 2.11 Pembagian daerah didekat dinding.....	23
Gambar 3.1 Gambar penampang <i>backward facing step</i> dengan penambahan <i>circular bump</i> .....	28
Gambar 3.2 (a) Meshing pemodelan tanpa <i>bump</i> (b) Meshing pada daerah <i>bump</i> (c) Meshing pada pemodelan <i>backward facing step</i> .....	29

Gambar 3.3 Pemilihan model turbulen.....	30
Gambar 3.4 <i>Boundary condition</i> pada sisi <i>inlet</i> .....	31
Gambar 3.5 Diskritisasi untuk <i>pressure</i> , momentum, TKE, TDR .....	32
Gambar 3.6 Grafik <i>grid independensi</i> .....	33
Gambar 4.1 Visualisasi kontur kecepatan pada saluran <i>backward facing step</i> .....	38
Gambar 4.2 Titik <i>reattachment</i> .....	38
Gambar 4.3 Visualisasi kontur tekanan.....	39
Gambar 4.4 Grafik <i>coefficient of pressure</i> pemodelan tanpa <i>bump</i> .....	40
Gambar 4.5 Grafik <i>coefficient friction</i> pemodelan tanpa <i>bump</i> .....	41
Gambar 4.6 Resirkulasi aliran tanpa menggunakan <i>bump</i> dan dengan variasi jarak <i>bump</i> .....	42
Gambar 4.7 Grafik panjang <i>reattachment</i> .....	43
Gambar 4.8 Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/h$ , model <i>backward facing step</i> tanpa dan dengan penambahan <i>bump</i> .....	45
Gambar 4.9 Visualisasi kontur kecepatan model <i>backward facing step tanpa</i> dan dengan penambahan <i>bump</i> .....	47
Gambar 4.10 Perbandingan grafik intensitas turbulensi pada <i>cross section</i> $x = 0h$ .....	49
Gambar 4.11 Visualisasi kontur intensitas turbulensi tanpa dan dengan penambahan <i>bump</i> .....	50

Gambar 4.12 Perbandingan grafik  $cf$  tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump*..... 52

Gambar 4.13 Grafik perbandingan *coefficient of pressure* dari tiap-tiap pemodelan..... 54

Gambar 4.14 Visualisasi tekanan statis pada pemodelan tanpa dan dengan penambahan *bump* ..... 56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan panjang <i>reattachment</i> dari berbagai model turbulen .....	14
Tabel 3.1 Spesifikasi pemodelan <i>backward facing step</i> .....	27
Tabel 3.2 Hasil grid independensi pemodelan tanpa <i>bump</i> ..	33
Tabel 3.3 Perbandingan jarak <i>reattachment</i> .....	34
Tabel 4.1 Perbandingan jarak <i>reattachment</i> dari tiap-tiap pemodelan .....	43
Tabel 4.2 Perbandingan nilai <i>pressure drop</i> dari tiap-tiap pemodelan .....	54
Tabel 4.3 Perbandingan nilai <i>shape factor</i> dengan panjang <i>reattachment</i> .....	57

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam studi aliran fluida terdapat suatu permasalahan aliran didalam saluran *back facing step*. *Backward facing step* adalah sebuah saluran yang mengalami ekspansi atau pembesaran penampang pada bagian *downstream*. Pada aplikasinya saluran *backward facing step* banyak digunakan pada sistem perpipaan, terowongan, penerbangan dan pelayaran. Saluran mengembang ini juga dapat kita temukan pada *heat exchanger*, digunakan untuk menurunkan kecepatan fluida sehingga perpindahan panas berlangsung efisien, dan pada gas turbin yang berfungsi untuk menaikkan tekanan kerja dalam ruang bakar.

Pada saat fluida melewati suatu benda padat maka akan terbentuk *boundary layer* atau yang disebut lapisan batas yang disebabkan oleh gesekan aliran fluida dengan permukaan benda yang dilewatinya. Fluida yang melewati benda yang berbentuk lengkungan akan terjadi perubahan tekanan dan kecepatan disepanjang permukaan benda lengkung tersebut. Perbedaan tekanan dan kecepatan ini yang menimbulkan terjadinya separasi, dimana momentum dari aliran fluida tidak mampu melawan adanya kenaikan dan penurunan tekanan dan gesekan yang terjadi dipermukaan benda lengkung.

Pada saluran *backward facing step* banyak fenomena yang sangat kompleks seperti munculnya separasi, resirkulasi, dan *vortex*. Fenomena separasi aliran disebabkan oleh ketidakstabilan aliran yang mengalir pada suatu penampang yang diakibatkan oleh pelebaran penampang secara tiba-tiba. Separasi aliran mengakibatkan adanya *blockage* pada aliran utama yang berakhir pada pengurangan debit (*flow rate*). Resirkulasi aliran dan *vortex*

menyebabkan adanya aliran balik (*back flow*) sehingga mengganggu aliran utama.

Penelitian *backward facing step* sebelumnya telah dilakukan oleh **Driver dan Seegmiller (1985)** yang melakukan penelitian secara eksperimen dan numerik tentang panjang *reattachment* pada nilai rasio ekspansi  $ER = 1.12$  dan bilangan reynold 37500. Penelitiannya juga memvariasikan sudut dinding bagian atas ( $0^\circ$  dan  $6^\circ$ ) dan membandingkan dua model turbulen ( $k-\epsilon$  dengan ASM). Dalam studinya tentang *backward facing step* menunjukkan bahwa panjang *reattachment* sebanding dengan bukaan dinding bagian atasnya, namun secara simulasi model turbulen ASM lebih mendekati hasil eksperimen dari pada model turbulen  $k-\epsilon$ .

**Biswas dkk (2004)** yang mengukur panjang *reattachment* terhadap ekspansi rasio dan *reynold number*, dengan variasi  $ER$  (1.9423, 2.5, dan 3.0) dan variasi *reynold number* (200, 400, 600, dan 800). Menyatakan bahwa setiap kenaikan *reynold number* maka didapatkan titik *reattachment* yang semakin jauh dari *step* dan semakin tinggi *stepnya* maka semakin panjang rentang antara titik *reattachment* dengan *stepnya*. Jadi dapat disimpulkan bahwa semakin jauhnya titik *reattachment* berbanding lurus dengan kenaikan *reynold number* dan berbanding lurus juga dengan tinggi *stepnya*.

**Kim dkk. (2005)** melakukan studi numerik menunjukkan bahwa model turbulensi didekat dinding (*near wall treatment*) *non-equilibrium* yang disimulasikan dengan berbagai macam model turbulen (SKE, RNG, RKE, RSM, SKW, dan SST). Dalam studi ini menghasilkan kesimpulan bahwa *non-equilibrium wall functions* dengan menggunakan model RNG dan RKE menampilkan hasil yang bagus dan mendekati hasil eksperimen untuk memprediksi aliran *beckward facing step*.



Penelitian tentang karakteristik *boundary layer* yang melewati gundukan setengah lingkaran telah dilakukan oleh **Wahyu (2005)** mengenai separasi dan *reattachment* aliran dibelakang gundukan (*bump*) setengah lingkaran, segitiga, dan persegi panjang. Hasil penelitiannya dapat disimpulkan bahwa separasi *massive* pada *bump* setengah lingkaran terjadi akibat momentum aliran tidak mampu mengatsasi *adverse pressure gradient* dan tegangan geser. Sedangkan untuk *bump* segitiga dan persegi panjang separasi *massive* terjadi karena *adverse pressure gradient* yang tajam akibat perubahan sudut yang tajam pada permukaan *bump*. Besarnya nilai  $Re$  sangat berpengaruh terhadap titik separasi pada *bump* setengah lingkaran, sedangkan pada *bump* segitiga dan persegi panjang besarnya nilai  $Re$  tidak berpengaruh terhadap titik separasi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Perbedaan luasan penampang berdampak pada peningkatan *adverse pressure gradient* (APG) sehingga memicu separasi dan terjadinya peningkatan tekanan. Terbentuknya separasi dan *recirculation* akan mengganggu aliran utama, yang nantinya berdampak pada jarak *reattachment*. Panambahan bodi pengganggu pada sisi *upstream* berupa *circular bump* (dengan memvariasikan jarak  $S/h = -0.58, -1.02, -1.47, \text{ dan } -2.07$ ), diharapkan dapat meningkatkan aliran semakin turbulen, aliran turbulen akan meningkatkan momentum aliran yang nantinya akan mempengaruhi jarak *reattachment*, sehingga dapat mengurangi *losses* yang terjadi pada saluran *backward facing step*.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut :

1. Tujuan umum :

Mengetahui fenomena aliran pada saat melewati penampang *beckward facing step* dengan penambahan *circular bump*.

2. Tujuan khusus :

a. Secara kuantitatif

- Grafik vektor kecepatan pada daerah *downstream*
- *Coefficient Pressure* (Cp) dan *skin friction coefficient* (Cf)
- Panjang *reattachment*
- Nilai *Shape factor*

b. Secara kualitatif

- ✓ *Velocity vector*
- ✓ Grafik *Turbulence intensity*

### 1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dapat diambil beberapa batasan masalah agar penelitian yang dilakukan lebih fokus. Adapun batasan masalah sebagai berikut :

- a. Fluida yang digunakan adalah udara yang bersifat *incompresible, steady* dan mempunyai profil kecepatan sama pada posisi *inlet (uniform)*.
- b. Penelitian dilakukan pada kondisi tidak terjadi perpindahan panas antara fluida dengan sistem.
- c. Kekasaran permukaan diabaikan.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain :

- a. Mengetahui karakteristik aliran pada *backward facing step* dengan penambahan bodi pengganggu
- b. Melengkapi penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Bilangan Reynold

Dalam suatu penelitian sering kali tidak bisa mengukur gaya yang bekerja pada suatu bodi secara langsung. Akan tetapi harus menggunakan perbandingan untuk melakukan pengukuran. Pengukuran yang dilakukan pada kedua bodi yang akan diukur harus memiliki kesamaan, baik kesamaan geometris dan kesamaan kinematis. Cara membandingkannya adalah dengan menyatakan gaya yang terjadi dalam bentuk bilangan yang tidak berdimensi. Salah satu bilangan yang tidak berdimensi dan sering dipakai dalam ilmu mekanika fluida adalah bilangan reynold. Bilangan reynolds merupakan para meter kunci dari berbagai macam aliran fluida. Bilangan reynolds secara matematis didefinisikan sebagai berikut :

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot h}{\mu} \quad 2.1$$

Dimana :

$Re_{Dh}$  = reynolds number

$\rho$  = massa jenis fluida, ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$U_{ref}$  =

central velocity fluida pada inlet test section, ( $\frac{m}{s}$ )

$h$  = tinggi step (m)

$\mu$  = viskositas kinematis fluida (kg/m.s)

### 2.2 Coefficient of Pressure (Cp)

Pada sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering sekali dilakukan modifikasi parameter  $\Delta p / \rho V^2$ , dengan memasukan faktor  $\frac{1}{2}$  untuk membuat *denominator* menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut :

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad 2.2$$

Dimana  $\Delta p$  adalah tekanan lokal dikurangi dengan tekanan *freestream*,  $\rho$  dan  $V$  adalah properti dari aliran *freestream*. Rasio ini disebut dengan *euler number* atau yang biasa disebut dengan *pressure coefficient* ( $C_p$ ).

### 2.3 Skin Friction Coefficient ( $C_f$ )

Tegangan geser dinding atau *skin friction Coefisient* ( $C_f$ ) secara matematis didefinisikan sebagai berikut:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad 2.3$$

Dimana:

$\tau_w$  = tegangan geser pada dinding ( $\text{N/m}^2$ )

$\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U_\infty$  = kecepatan *freestream* ( $\text{m/s}$ )

$C_f$  = *coefficient of friction*

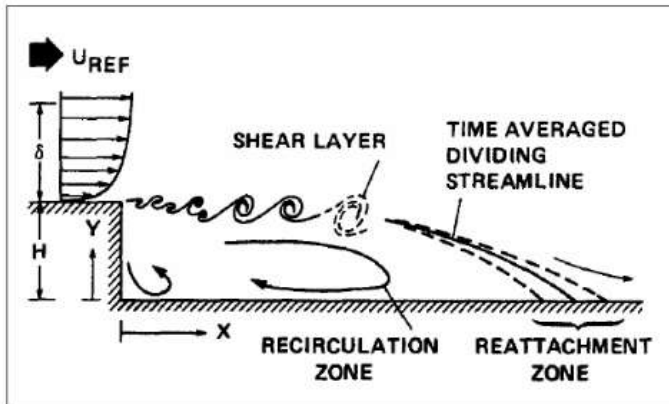
### 2.4 Aliran didalam *Backward Facing Step*

Perubahan luas penampang merupakan bagian dari sistem saluran perpipaan. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya *losses* pada saluran berupa separasi dan juga *secondary flow* yang akan berpengaruh terhadap aliran utama, tekanan dan debit air yang mengalir pada saluran.

#### 2.4.1 Mekanisme Terjadinya Separasi

Terjadinya separasi pada dasarnya lebih didominasi oleh adanya efek pembesaran penampang aliran secara mendadak dari pada efek friksi yang ada pada aliran. Pembesaran penampang aliran ini akan membuat momentum aliran fluida menjadi lebih lemah dan menimbulkan adanya *adverse pressure gradient* (APG) atau sering disebut *back pressure*. Saat membesarnya penampang aliran, kecepatan aliran fluida akan menurun sehingga tekanan dinamis fluida juga ikut menurun, sementara fluida

memasuki daerah bertekanan tinggi (*high pressure region*), dimana *adverse pressure gradient* mulai terjadi. Kondisi inilah yang menyebabkan momentum fluida tidak lagi mampu mengikuti permukaan yang melebar, sehingga aliran akan terseparasi. Seperti ditampilkan pada gambar 2.1.



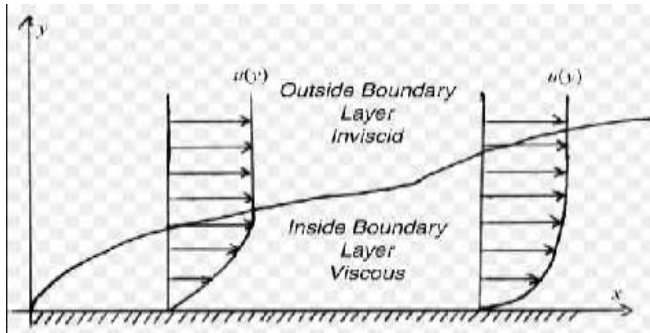
Gambar 2.1 Separasi pada step (Luke Jongebloed, 2008)

#### 2.4.2 Aliran Sekunder

Aliran sekunder merupakan aliran yang terpisah dari aliran utama. Setelah aliran terseparasi dikarenakan terekspansinya aliran akibat melebarnya saluran, maka akan terjadi aliran balik (*back flow*) yang kemudian membentuk aliran sekunder berupa *vortex* pada daerah disekitar dinding bawah yang berekspansi. Aliran sekunder ini akan terus mengecil sampai titik *reattachment* tercapai.

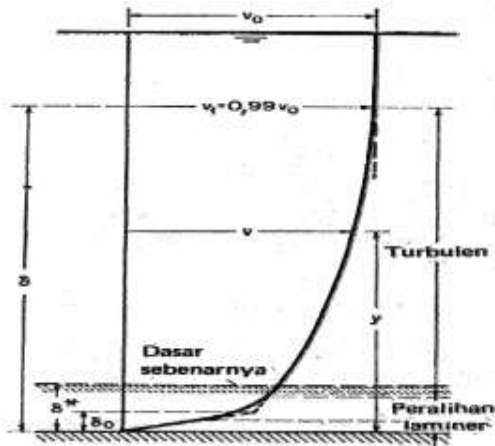
#### 2.4.3 Fenomena *Bondery Layer*

Aliran yang melewati suatu benda akan membentuk lapisan tipis yang disebut *boundary layer*. Lapisan ini terbentuk karena adanya gesekan antara aliran fluida dengan permukaan benda yang dilewati.



Gambar 2.2 Viscous and inviscid region (google)

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa daerah yang ada didalam *boundary layer* masih dipengaruhi oleh efek viskositas yang cukup besar (*viscous*), sedangkan daerah yang ada diluar *boundary layer* memiliki efek viskositas yang kecil (*inviscid*) sehingga dapat diabaikan. Jarak yang diukur dari permukaan body arah normal hingga posisi  $u = 0.99u_{\infty}$  disebut dengan tebal lapisan batas ( $\delta$ ) seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Tebal lapisan batas ( $\delta$ ) merupakan besaran jarak yang tegak lurus terhadap permukaan batas dimana kecepatan  $v_1$  sama dengan 99% dari kecepatan batas  $v_0$ .

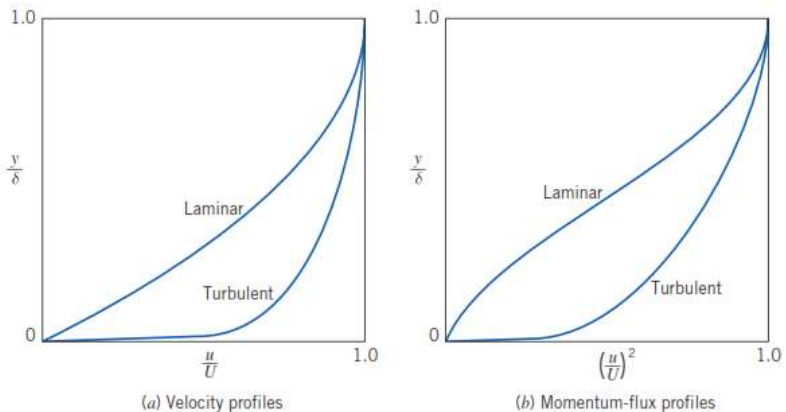


Gambar 2.3 Tebal lapisan batas ( $\delta$ ) (google)



Pada awalnya, fluida mengalir dengan distribusi kecepatan yang *uniform*. Ketika melewati permukaan plat, fluida tersebut mengalami gesekan. Adanya tegangan geser yang bekerja sepanjang aliran menghasilkan distribusi kecepatan. Distribusi kecepatan pada daerah tersebut tidak sama, dimana fluida yang bergesekan dengan permukaan memiliki kecepatan sama dengan nol dan kecepatannya akan mencapai suatu batas yang dinamakan kecepatan udara bebas (*freestream*) ketika fluida semakin jauh letaknya dari permukaan plat.

Gambar 2.4 (a) menunjukkan profil kecepatan aliran turbulen yang lebih tumpul dari pada aliran laminar pada saat melewati bidang datar, pada gambar 2.5 (b) pada saat kecepatan *freestream* yang sama momentum fluks mengakibatkan *boundary layer* aliran turbulen lebih besar dibandingkan *boundary layer* aliran laminar. Separasi akan terjadi apabila momentum lapisan fluida pada permukaan berkurang yang diakibatkan oleh tekanan dan kekentalan.



Gambar 2.4 (a) Profil kecepatan. (b) Profil momentum fluks  
(fox,et,al 2004)

Perubahan tekanan akan menyebabkan perubahan yang signifikan pada profil kecepatan *boundary layer* aliran laminar dan turbulen, solusi untuk perubahan tekan yang tidak nol dapat diperoleh dari persamaan integral momentum :

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{d}{dx}(U^2 \theta) + \delta^* \frac{dU}{dx} \quad 2.4$$

Dapat diuraikan menjadi:

$$\frac{\tau_w}{\rho} = U^2 \frac{d\theta}{dx} + (\delta^* + 2\theta)U \frac{dU}{dx}$$

Atau

$$\frac{\tau_w}{\rho U^2} = \frac{C_f}{2} = \frac{d\theta}{dx} + (H + 2) \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx}$$

Dimana  $H = \frac{\delta^*}{\theta}$  adalah profil kecepatan “*Shape Factor*”.

*Shape Factor* merupakan peningkatan gradien tekanan yang merugikan. Untuk *boundary layer* aliran turbulen, nilai H meningkat dari 1.3 untuk gradien tekanan nol sampai sekitar 2,5 pada *separation*. Untuk aliran Laminar dengan gradien tekanan nol, H = 2.6 dan *separation* H = 3.5.

Adanya perbesaran penampang aliran bagian bawah yang kemudian menimbulkan aliran sekunder, akan merusak *boundary layer* dinding bagian bawah pada sisi *downstream*. *Boundary layer* tidak akan terbentuk pada daerah yang mengalami aliran sekunder ini, yaitu daerah mulai terjadinya pembesaran penampang dimana aliran sekunder mulai terjadi, sampai pada titik pulihnya aliran fluida dimana aliran tepat tidak mengalami aliran sekunder. *Boundary layer* baru akan terbentuk kembali mulai dari tercapainya titik *reattachment lenght*. Dan akan terus mengembang sampai ke *outflow*. Sedangkan *boundary layer* pada dinding bagian atas sudah terbentuk mulai dari *inlet* dan terus mengembang sampai ke *outlet*. Jika diperhatikan, *boundary layer* bagian bawah lebih tebal dari pada *boundary layer* bagian atas. Hal ini dikarenakan adanya perbesaran penampang pada aliran disekitar dinding bagian bawah yang menimbulkan *vortex* menyebabkan terganggunya aliran (*disturbance*) sehingga aliran turbulen yang sudah berfluktuasi akan semakin berfluktuasi lagi. Hal inilah yang menyebabkan *boundary layer* berkembang menjadi lebih tinggi. Berbeda kondisinya dengan dinding bagian atas, dimana aliran didaerah dekat dinding atas tidak mengalami gangguan berupa *vortex*, dinding bagian atas berfungsi sebagai

dinding penuntun (*guidance wall*) sehingga aliran dapat dituntun dengan cukup teratur mengikuti kontur dinding tersebut.

#### **2.4.4 Efek *boundary layer* turbulen terhadap separasi**

*Boundary layer* dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu laminar *boundary layer* dan turbulen *boundary layer*. Kedua *boundary layer* tersebut tergantung pada bilangan reynolds. Didalam aliran fluida, proses peralihan dari laminar *boundary layer* ke turbulen *boundary layer* disebut sebagai transisi. Lamanya proses transisi dipengaruhi oleh gradien tekanan, kekasaran permukaan, perpindahan panas, gaya bodi dan gangguan aliran bebas (Fox, et al, 2004).

Meskipun *boundary layer* turbulen memiliki harga friksi permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan *boundary layer* laminar, namun *boundary layer* turbulen memiliki keuntungan. *Boundary layer* turbulen memiliki profil kecepatan yang berbeda dengan *boundary layer* laminar. Pada *boundary layer* turbulen, kecepatan fluida yang ada didekat permukaan memiliki harga yang lebih besar dibandingkan yang terjadi pada *boundary layer* laminar.

Harga kecepatan yang besar pada *boundary layer* turbulen ini akan mengakibatkan energi kinetik yang juga besar, sehingga akan menjadikan fluida tetap mengalir sebelum fluida tidak sanggup mengatasi tegangan geser dan *adverse pressure gradient* yang akan menyebabkan terjadinya separasi. Sehingga dengan adanya *boundary layer* turbulent separasi yang terjadi akan semakin tertunda dan gaya *drag* yang terjadi akan semakin kecil.

#### **2.5 Karakteristik Aliran pada *Backward Facing Step***

**Kim dkk. (2005)** telah melakukan penelitian mengenai perbandingan model turbulensi didekat dinding dengan *reynolds number* 38000 pada *backward facing step*. Pada studi ini, *backward facing step* yang digunakan sebagai benda uji memiliki perbandingan tinggi inlet dan outlet  $ER = 1.1$  dengan tinggi *step* ( $h = 0.0127$  m). *Standart wall function*, *non equilibrium wall functions* dan *two layer* dimodelkan dengan perbedaan 6 model

turbulen *realizable k-ε (RKE)*, *renormalization group k-ε (RNG)*, *Reynolds stress model (RSM)*, *standard k-ε (SKE)*, *standard k-ω (SKW)* dan *shear-stress transport k-ω (SST)*, pada Re yang tinggi (38000) didapatkan hasil sebagai berikut :

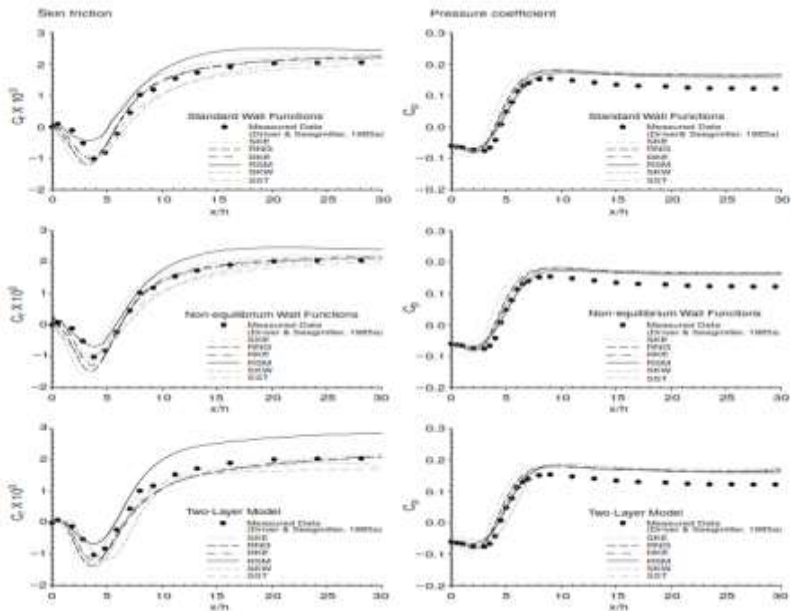
**Tabel 2.1 Perbandingan panjang *reattachment* dari berbagai model turbulen**

Turbulence models	Near-wall treatment methods			Measured (1985a)
	Standard wall functions	Non-equilibrium wall functions	Two-layer model	
Reattachment length ( $x_R/b$ ) for 0° wall-angle				
SKE	4.9-5.1	5.1-5.5	5.7-5.8	6.20 ± 0.10
RNG	5.7-5.9	6.1-6.3	6.4-6.5	
RKE	5.7-5.9	6.1-6.3	6.0-6.2	
RSM	5.1-5.3	5.7-5.9	5.6-5.7	
SKW			7.5-7.6	
SST		6.7-6.9 6.1-6.3	6.5-6.6	
Reattachment length ( $x_R/b$ ) for 90° wall-angle				
SKE	5.9-6.1	6.3-6.6	7.0-7.1	8.30 ± 0.15
RNG	7.4-7.6	8.0-8.2	8.5-8.6	
RKE	7.4-7.6	8.0-8.2	8.9-9.0	
RSM	5.9-6.1	6.6-7.1	6.9-7.0	
SKW		9.4-9.6	10.1-10.2	
SST		8.4-8.6	9.6-9.7	

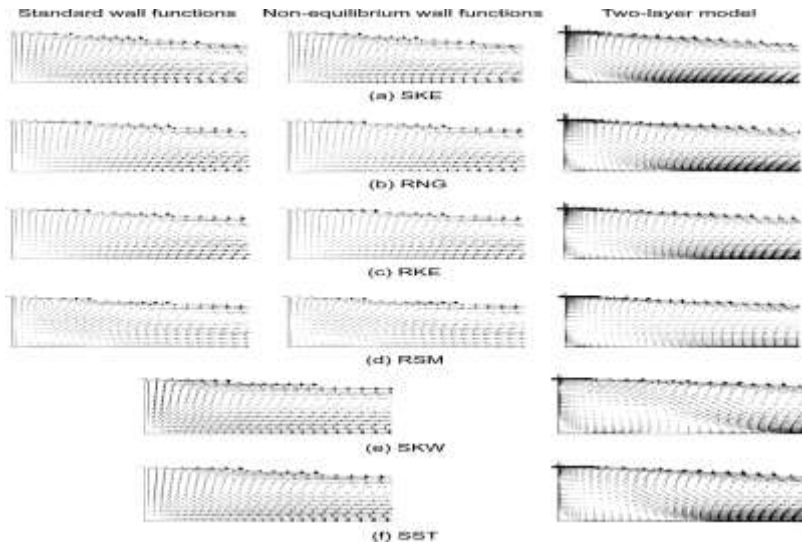
Simulasi yang dilakukan **Kim** menyatakan bahwa panjang *reattachment* dengan menggunakan *standar wall function* memprediksi error sekitar 7.3-28% tanpa memperhatikan model turbulen yang diterapkan pada kedua sudut. Untuk kasus *non-equilibrium wall function*, model RNG dan RKE memprediksi panjang *reattachment* errornya 2.4% dari pengukuran kedua sudut. Model SKE dan RMS dengan menerapkan *non-equilibrium wall function* memprediksi panjang *reattachment* untuk kedua sudut adalah 7.3-22%. *Two-layer model* memprediksi error panjang *reattachment* untuk kasus SKE dan RSM adalah 8.1-16% untuk kedua sudut dinding. Untuk RNG dan RKE dengan menggunakan *two-layer model* memprediksi panjang *reattachment* adalah 3.0-7.8%. model SKE menghitung dengan metode *mesh for wall function* memprediksi panjang *reattachment* adalah 8.6-14% untuk kedua sudut. Model SST juga menggunakan *mesh for wall function* memprediksi panjang *reattachment* 2.4%. Ketika model SKW dihitung dengan *mesh for two-layer model* panjang *reattachment* diperkirakan 21% untuk kedua sudut. Model SST menghitung dengan menggunakan *mesh for two-layer model* memprediksi panjang *reattachment* adalah

4.6-16% untuk kedua sudut. Secara keseluruhan RNG dan RKE dengan model *non-equilibrium wall function* dan SST dengan model *mesh for wall function* menampilkan hasil yang baik untuk memprediksi panjang *reattachment*.

Gambar 2.5 membandingkan grafik *skin friction* ( $C_f$ ) dan *static pressure coefficient* ( $C_p$ ). Untuk kasus sudut  $0^\circ$ , *standard wall function* memprediksi  $C_f$  untuk  $x/h \geq 8$  dengan error 38%, sedangkan *non-equilibrium wall function* memprediksi error sebesar 31%, dan *two-layer model* memprediksi error sebesar 52%. Model RNG dan RKE dengan *non equilibrium wall function* menampilkan hasil yang lebih baik dengan prediksi  $C_f$  untuk  $x/h \geq 8$  adalah 10%.



Gambar 2.5 Grafik  $C_f$  dan  $C_p$  terhadap  $x/h$  untuk perbedaan model turbulen dan *near-wall treatment*  $\alpha=0^\circ$ ,  $Re=38000$  (Kim dkk, 2005)

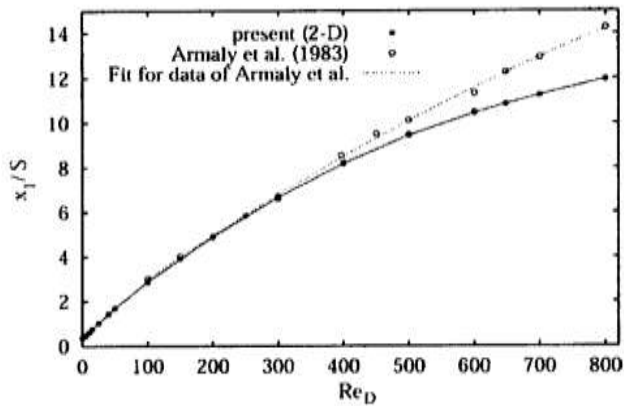


Gambar 2.6 Perbandingan distribusi kecepatan pada sudut aliran *backward facing step* yang diprediksi dengan model turbulen yang berbeda  $\alpha=0^\circ$ ,  $Re=38000$  (Kim dkk, 2005)

Kesimpulan dari penelitian **Kim dkk (2005)** menyatakan bahwa untuk kasus ini dengan memakai model turbulen RNG dan RKE *non equilibrium wall function* menampilkan hasil yang baik untuk memprediksi panjang *reattachment*,  $C_f$  dan  $C_p$ .

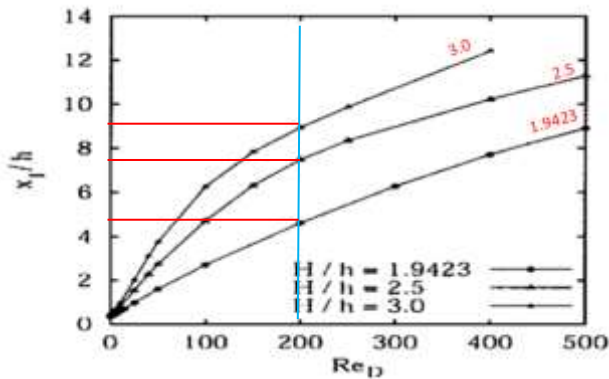
## 2.6 Pengaruh Variasi Expansi dan variasi reynold pada Backward Facing Step

**Biswas dkk (2004)** dalam penelitiannya yang berjudul aliran *backward facing step* dengan variasi ekspansi rasio dan *reynolds number* menyatakan bahwa panjang *reattachment* akan naik seiring kenaikan ekspansi rasio. Dapat dilihat gambar 2.7, grafik hubungan antara panjang *reattachment* terhadap *reynolds number*. Semakin naik nilai *reynolds number* maka semakin jauh panjang titik *reattachment*nya



Gambar 2.7 Grafik *Reynolds number* terhadap panjang *reattachment* (Biswas dkk, 2004)

Gambar 2.8 menjelaskan hubungan antara panjang *reattachment* dengan ekspansi rasio. Misalkan pada *reynolds number* 200 untuk ekspansi rasio 1.9423 bisa dilihat panjang *reattachment*-nya 4.7, sedangkan untuk ekspansi rasio 2.5 panjang *reattachment*-nya adalah 7.8 selanjutnya untuk ekspansi rasio 3.0 panjang *reattachment*-nya adalah 9.



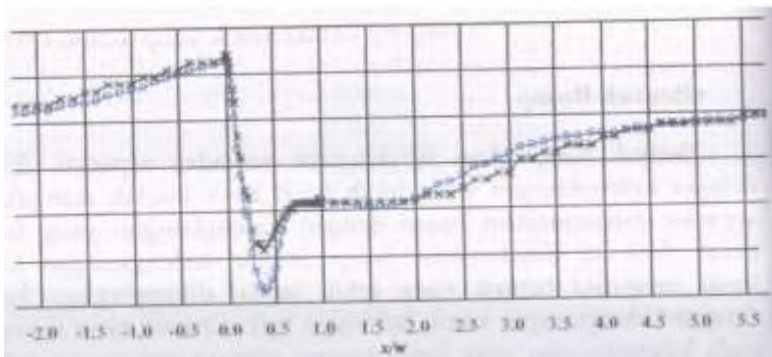
Gambar 2.8 Perbandingan jarak *reattachment* dengan perbedaan ekspansi rasio (Biswas dkk, 2004)

Hasil penelitian **Biswas dkk (2004)** dapat disimpulkan bahwa setiap kenaikan nilai *reynolds* dan kenaikan ekspansi rasio maka jarak *reattachment*-nya semakin jauh.

## 2.7 Pengaruh bentuk *Bump* terhadap separasi

*Bump* dengan kelengkungan yang lebih kecil akan mudah mengalami separasi dibandingkan *bump* dengan kelengkungan yang lebih besar. Hal ini dikarenakan *bump* dengan kelengkungan lebih besar memiliki bentuk yang lebih landai, sehingga titik separasi akan tertunda. Separasi yang terbentuk disebabkan oleh *adverse pressure gradient* yang terjadi lebih kecil. Sebelumnya telah dilakukan penelitian yang mengkaji tentang aliran melintasi *bump* dengan bentuk yang berbeda-beda.

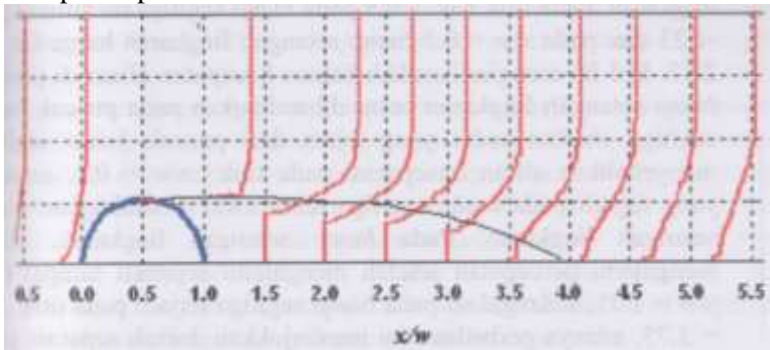
Penelitian oleh **Wahyu (2005)** tentang separasi dan titik *reattachment* aliran dibelakang gundukan (*bump*) setengah lingkaran, segitiga dan persegi panjang. *Bump* yang digunakan memiliki geometri dengan diameter 42mm, segitiga samasisi dengan setiap sisi memiliki panjang 42mm, dan persegi panjang yang berukuran 42mm x 21mm. Distribusi tekanan pada *bump* setengah lingkaran ditunjukkan pada gambar 2.9. Posisi *bump* terletak pada rentang ( $0.0 < x/w < 1.0$ ), dimana  $w$  adalah lebar *bump* ke arah *downstream*.



Gambar 2.9 Distribusi tekanan pada *bump* setengah lingkaran (wahyu 2005)



Dari gambar 2.9 terlihat bahwa pada daerah sebelum *bump* (posisi *upstream*), aliran mengalami penurunan tekanan (*favorable pressure gradient*) yang disebabkan perubahan penampang *bump* dan mengakibatkan kenaikan kecepatan pada ( $0.0 < x/w < 0.5$ ) sehingga mencapai kecepatan maksimum pada puncak *bump* ( $x/w = 0.37$ ), setelah itu aliran mengalami peningkatan tekanan (*adverse pressure gradient*) dan aliran terseparasi pada  $x/w = 0.75$ .



Gambar 2.10 Distribusi kecepatan pada *bump* setengah lingkaran (wahyu 2005)

Gambar 2.10 menunjukkan distribusi kecepatan pada *bump* setengah lingkaran. Aliran mengalami percepatan saat melewati *bump* yang disebabkan oleh pengecilan luas penampang karena adanya *bump*, profil kecepatan dititik  $x/w = 0.5$  memiliki kecepatan  $u/U = 1.78$ . setelah melewati *bump* aliran akan mengalami perlambatan hingga kecepatannya kembali seperti semula. Adanya *adverse pressure gradient* disisi *downstream* mengakibatkan terjadinya separasi. Daerah separasi ini semakin lama semakin mengecil sampai akhirnya profil kecepatan kembali normal. Titik dimana aliran terseparasi kembali normal disebut titik *reattachment*. Perbedaan titik *reattachment* yang terjadi pada variasi *reynolds number* dikarenakan pada *Re* tinggi mempunyai momentum aliran yang lebih besar dari pada aliran pada *Re* rendah, sehingga *Re* tinggi dapat mentransfer energi yang lebih

besar dari daerah atas separasi menuju daerah separasi. Akibatnya daerah separasi semakin lama semakin mengecil.

## 2.8 Pemodelan Numerik

### 2.8.1 *Computational Fluid Dynamics*

*Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan perangkat analisa sistem dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain didasarkan simulasi dengan bantuan komputer. CFD hakikatnya adalah perangkat *software* menggunakan *finite volume method* dengan memperlakukan fluida menjadi banyak volume kecil dan melalui algoritma tertentu untuk menyelesaikan persamaan *Navier-Stokes*. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju aliran massa (*mass flow rate*) [Ikhwan, 2000].

Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida, perpindahan panas dan perpindahan massa untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence* model, spesifikasi parameter dan *grid generation*) kemudian, *solver*, dan *postprocessing* (*visualization* dan *data treatment*).

Pada dasarnya, pemodelan numerik merupakan sebuah metode untuk menyelesaikan sebuah kasus dengan pendekatan dari iterasi terhadap persamaan-persamaan yang berlaku. Pada kasus studi aliran dan perpindahan panas pemodelan numerik dilakukan dengan berlandaskan pada persamaan konservasi massa, momentum fluida, dan persamaan energi.

Persamaan konservasi massa berdasar pada prinsip fisika dasar, yaitu massa adalah kekal. Pada benda kerja berupa fluida, konservasi massa dapat diartikan jumlah massa fluida yang masuk sama dengan jumlah massa fluida yang keluar. Persamaan konservasi massa ini dapat dijabarkan [User guide CFD]:

$$\left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz = - \frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) &= 0 \dots\dots\dots\end{aligned}$$

Persamaan momentum fluida berdasar pada hukum kedua Newton, yaitu gaya dari sebuah benda merupakan perkalian antara massa dengan percepatan benda. Pada pemodelan numerik persamaan momentum ini menentukan besar kecepatan dan percepatan tiap partikel dari fluida. Persamaan momentum fluida ini dapat dijabarkan dalam koordinat kartesian sebagai berikut [User guide CFD]:

$$\begin{aligned}\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

Karena adanya perbedaan temperatur pada setiap titik di dalam sistem, maka diperlukan sebuah persamaan tambahan untuk menjabarkan perubahan temperatur yang terjadi. Pada *computational fluid dynamics*, persamaan ini dikenal dengan *energy equation* dan dapat dijabarkan [User guide CFD]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &- \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zy})}{\partial z} + \rho f \cdot V\end{aligned}$$

## 2.8.2 Persamaan Dasar dan Model Turbulensi

Persamaan *Reynolds Average Navier Stokes* (RANS), *Incompressible* dapat dinyatakan dalam notasi tensor cartesian berikut [Goren dkk, 2010]:

$$\begin{aligned}\frac{\delta U_i}{\delta x_i} &= 0 \\ \rho \frac{\delta U_i}{\delta t} + \rho \frac{\delta(U_j U_i)}{\delta x_j} &= - \frac{\delta P}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j} (2\mu S_{ij} - \rho U_i' U_j')\end{aligned} \quad 2.5$$

dengan  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $U$ ,  $P$ ,  $U'$  merupakan densitas fluida, viskositas molekuler, kecepatan rata-rata, tekanan statis rata-rata dan kecepatan yang berfluktuasi.

Model turbulensi *Spalart-Allmaras* (SA) merupakan salah satu persamaan paling populer dari *eddy-viscosity* berdasarkan model turbulensi pada beberapa tahun ini. Model membutuhkan solusi penambahan persamaan *transport* untuk kuantitas yang merupakan bentuk modifikasi dari viskositas kinematik turbulen. Perhitungan rotasi dan regangan tensor untuk istilah produksi yang dikombinasikan. Versi modifikasi yang digunakan dalam penelitian ini akan memberikan hasil perhitungan *eddy-viscosity* dekat inti *vortex*. Model *Reynold number* rendah S-A dan fungsi damping untuk viskositas turbulen, produksi turbulen dan disipasi. Sehingga membutuhkan distribusi *mesh* yang sangat baik didaerah dekat dinding.

Model turbulensi *Realizable k- $\mathcal{E}$*  (RKE) merupakan versi perbaikan Standard *k- $\mathcal{E}$* . Aplikasi dari model ini membutuhkan solusi 2 penambahan persamaan *transport* untuk energi kinetik turbulen dan disipasi turbulen. Dalam rangka memberikan pendekatan fisik pada  $C_\mu$  konstan. Saat ini istilah viskositas turbulen sebagai koefisien *closure*. Selanjutnya persamaan *transport* yang baru telah dikembangkan untuk disipasi turbulen dengan produksi persamaan fungsional dan disipasi dari disipasi turbulen. RKE cocok untuk model dengan *Reynolds number* yang tinggi sehingga sesuai digunakan untuk jenis aliran turbulen.

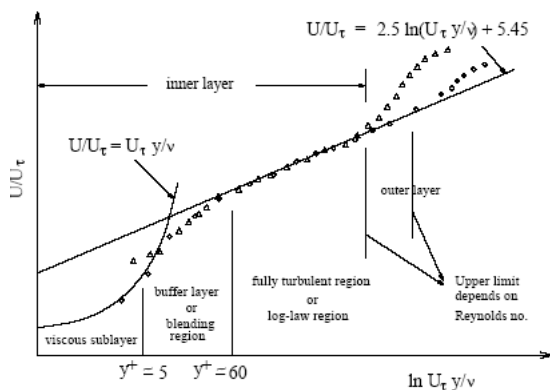
Model turbulensi Wilcox *k- $\omega$*  (WKO) merupakan versi perbaikan dari standard *k- $\omega$* . Seperti versi *standard*, dua persamaan *transport* tambahan untuk energi kinetik turbulen,  $k$  dan disipasi per unit energi kinetik,  $\omega$  dibutuhkan untuk menyelesaikan model ini. Persamaan *transport* untuk *k- $\omega$*  yang dinyatakan sebagai fungsi model WKO yang meningkatkan performa model *standard k- $\omega$*  untuk geseran bebas yang mengalir tanpa pengaruh efek aliran *boundary layer*.

Model turbulensi *Shear Stress Transport k- $\omega$*  (SST) merupakan versi perbaikan lebih lanjut untuk model *standard k- $\omega$* . Kekurangan dari model *standard k- $\omega$*  yang kurang sensitif

pada kondisi batas *free stream* untuk aliran tanpa geseran. Modifikasi ini disebabkan model baru menunjukkan *standard k- $\omega$*  untuk aliran tanpa geseran yang tidak memberikan sensitivitas dari model *standard k- $\omega$*  untuk kondisi batas *free stream*. Model SST juga termasuk definisi baru dari viskositas eddy untuk meningkatkan kemampuan prediksi dari model *standard k- $\omega$*  untuk aliran *boundary layer* dengan *adverse pressure gradient*. Kedua model SST dan WKO dapat diintegrasikan melalui *viscous sub-layer* dan keduanya tidak termasuk spesial korelasi *viscous* untuk daerah dekat dinding [Goren dkk,2010].

### 2.8.3 Daerah Dekat Dinding (*Near Wall Region*)

Daerah dekat dinding (*near-wall region*) memiliki pengaruh sangat besar dalam ketelitian hasil simulasi. Pemodelan yang akurat di dekat dinding merupakan hal yang penting untuk aplikasi teknik karena perkiraan penurunan tekanan (*pressure drop*), separasi aliran, lapisan batas bergantung kepada kebenaran prediksi gaya geser lokal pada dinding tersebut. Selain karena dinding memberikan pengaruh yang signifikan terhadap aliran turbulen. Juga karena perubahan karakteristik aliran yang paling menonjol terjadi pada daerah dekat dinding. Gambar 2.20 menunjukkan pembagian daerah dekat dinding pada suatu aliran [User guide CFD].



Gambar 2.11 Pembagian daerah dekat dinding (User guide CFD).

Daerah dekat dinding (*near wall region*) dapat dibagi menjadi 3 lapisan, yaitu:

- a. Daerah *viscous sublayer* (lapisan paling dalam), dimana aliran hampir seluruhnya laminar dan viskositas (molekular) memegang peranan penting pada perubahan momentum dan perpindahan panas atau massa. Berada pada  $y^+ < 5$ .
- b. Daerah *buffer layer* atau *blending* (terletak diantara lapisan *viscous sublayer* dan *log-law*), dimana pengaruh viskositas molekular dan turbulensi sama-sama memegang peranan penting, profil kecepatan gabungan dari laminar dan turbulent. Berada pada  $5 < y^+ < 60$ .
- c. Daerah *log-law* (lapisan paling luar) atau lapisan penuh turbulent (*fully turbulent layer*), dimana turbulensi memegang peranan utama sehingga profil kecepatan seluruhnya turbulen. Berada pada  $60 < y^+ < 300$ .

Dimana  $y^+$  adalah bilangan tak berdimensi yang mewakili jarak dari dinding terhadap titik tengah (*centroid*) *cell* pertama dari *mesh*.  $y^+$  dapat dihitung dengan persamaan [User guide CFD]:

$$y^+ = \frac{U_\tau y}{\nu} \quad 2.6$$

dengan :  $U_\tau$  = *local velocity* (kecepatan fluida di dekat dinding)

$y$  = jarak antara *cell* pertama dan dinding

$\nu$  = viskositas kinematis fluida

Model turbulensi  $K-\varepsilon$  dan RSM pada dasarnya cukup akurat untuk aliran turbulen pada daerah yang jauh dari dinding, tetapi tidak dapat memprediksikan perilaku aliran di dekat dinding dengan akurat, oleh karena itu diperlukan *treatment* tambahan untuk membuat kedua model tersebut lebih akurat untuk memprediksikan perilaku aliran dekat dinding, terutama pada aliran yang sangat terpengaruh oleh dinding (*wall-bonded flow*) [User guide CFD]. Pada FLUENT, terdapat 3 macam *near wall treatment*, yaitu:

1. *Standard Wall Functions*
2. *Non-Equilibrium Wall Functions*
3. *Enhanced Wall Treatment*

Pada dasarnya, fungsi dinding (*wall function*) merupakan suatu kumpulan aturan atau persamaan yang berfungsi sebagai kondisi batas untuk momentum, energi, dan besaran turbulen yang dibutuhkan pada model [**User guide CFD**].

➤ **Pilihan *Wall Function***

1. Standard dan *non-equilibrium wall function* terdiri dari sekumpulan persamaan yang didesain untuk aliran dengan *Re* tinggi.
2. *Mesh* di dekat dinding relatif kasar.
3. Daerah dekat dinding yang terpengaruh viskositas tidak dipecahkan.
4. Informasi pada masing-masing sel dihubungkan oleh suatu fungsi dinding yang diturunkan secara empiris.

➤ **Pilihan *Enhanced Wall Treatment***

1. Model ini mengkombinasikan penggunaan *enhanced wall function* dan model *two-layer*.
2. Digunakan untuk aliran dengan *Re* rendah atau aliran dengan fenomena aliran di dekat dinding yang kompleks.
3. Pada umumnya membutuhkan *mesh* yang sangat halus pada daerah dekat dinding.
4. Model turbulensi dimodifikasi untuk lapisan bagian dalam (lapisan yang terpengaruh oleh adanya dinding).





### BAB III

#### METODE PENELITIAN

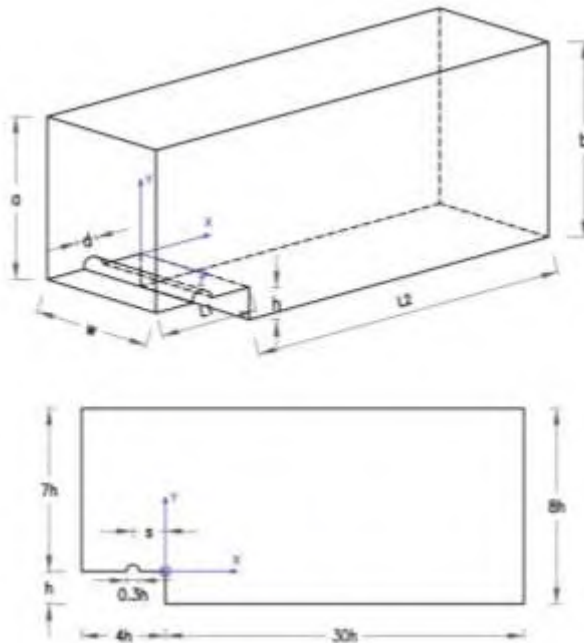
Pada penelitian ini akan membahas metode yang akan digunakan. Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan program CFD untuk menganalisis karakteristik aliran, distribusi tekanan, *skin friction coefficient*, profil kecepatan dan fenomena-fenomena yang terjadi pada *backward facing step*.

#### 3.1 Geometri *Backward Facing Step*

Pada penelitian ini menggunakan benda *backward facing step* dengan memvariasikan jarak bodi pengganggu berupa (*circular bump*). Seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.1 dengan spesifikasi benda uji dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi pemodelan backward facing step

No	Dimensi Pemodelan	Variable	Nilai (m)
1	Tinggi step (h)	h	0.01
2	Panjang bidang upstream (L1)	4h	0.04
3	Panjang bidang downstream (L2)	30h	0.3
4	Tinggi bidang downstream (b)	8h	0.08
5	Tinggi bidang upstream (a)	7h	0.07
6	Lebar benda uji (dibuat symmetry) (w)	10h/2	0.05
7	Ukuran bump (d)	d= 0.3h	0.003
8	Variasi jarak step (s)	x= -0.58h	-0.0058
		x= -1.02h	-0.0102
		x= -1.47h	-0.0147
		x= -2.07h	-0.0207



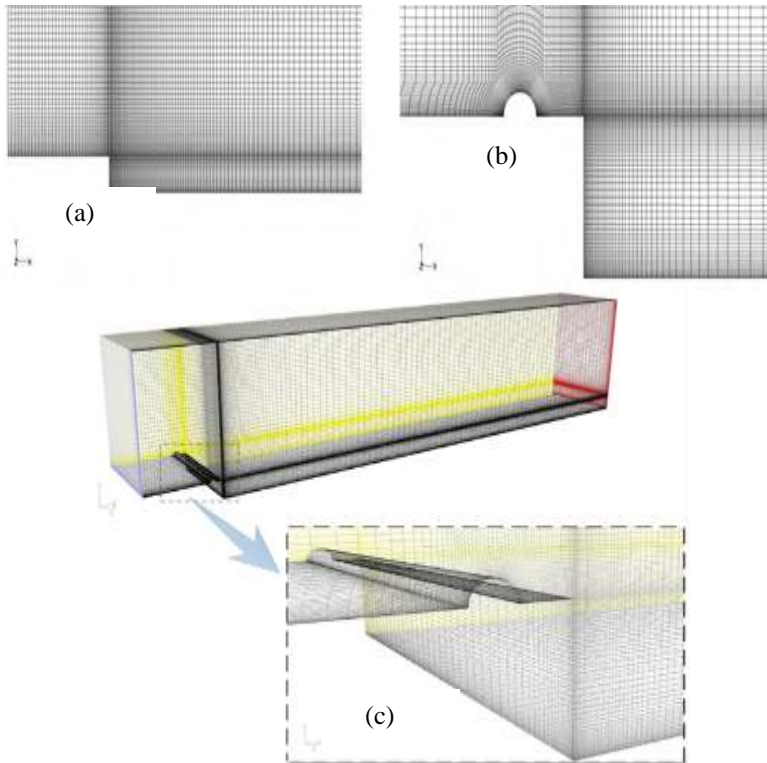
Gambar 3.1 Geometri penampang *backward facing step* dengan penambahan *circular bump*.

### 3.2 Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan program CFD komersial untuk melakukan pendekatan numerik dan membuat model awal serta melakukan meshing pada model. Secara umum, urutan kerja pada penelitian ini dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing* dan tahap *post-processing*.

#### 3.2.1 Tahap *pre-processing*

- Model benda uji (*backward facing step*) dibuat dengan mengacu pada geometri sesuai ukuran yang telah ditentukan. Penelitian ini memvariasikan jarak bodi pengganggu :  $s = -0.58h, -1.02h, -1.47h, -2.07h$ .
- Membuat meshing dengan distribusi mesh yang lebih rapat pada bagian dinding bawah dan dinding atas.



Gambar 3.2 (a). *Meshing* benda uji tanpa *bump*. (b). *Meshing* pada daerah *bump*. (c). *Meshing* pada benda uji *backward facing step*

- c) Mendefinisikan kondisi batas dengan maksud untuk menentukan batasan serta parameter-parameter yang digunakan pada penelitian ini. Kondisi *inlet* yaitu *velocity inlet*. Kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Pengganggu setengah lingkaran didefinisikan sebagai *wall*. Benda uji dibuat simetri karena diasumsikan aliran disepanjang koordinat *z* hampir sama.

### 3.2.2 Tahap *Post Processing*

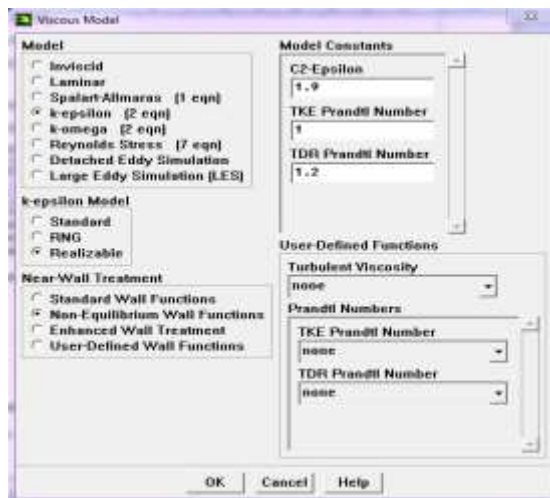
Untuk penyelesaian metoda numerik digunakan bantuan *software fluent* 6.3.26. Langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan pemodelan adalah sebagai berikut:

a. Grid

Pada langkah ini, yang dilakukan adalah mengimport grid yang telah dibuat pada *software gambit*. Pada proses pembuatan grid ini perlu diberikan grid independensi, yaitu proses penambahan meshing sampai hasil yang didapatkan sudah tidak berubah lagi walaupun jumlah *cell*-nya ditambah.

b. Models

Langkah ini merupakan pemodelan aliran (estimasi karakteristik aliran), penentuan model turbulen yang digunakan, penentuan besarnya konstanta yang digunakan serta menentukan solver yang digunakan. Pemodelan yang digunakan adalah *k- $\epsilon$  Realizable*. Pemodelan ini dipilih karena bisa memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan separasi, resikulasi, aliran pada jet atau *nozzle*. Kemudian untuk *near wall treatment* memilih *non-equilibrium wall function* sesuai dengan yang digunakan **Kim dkk (2005)**.



Gambar 3.3 Pemilihan model turbulen

c. Material

Dalam tahap ini dilakukan penentuan jenis material yang akan digunakan serta data-data properties dari material tersebut. Pada pemodelan ini dipilih udara sebagai fluida kerja dengan densitas ( $\rho$ ) = 1.22 kg/m<sup>3</sup> dan viskositas ( $\mu$ ) = 1.78 x 10<sup>-5</sup>.

d. Operating Condition

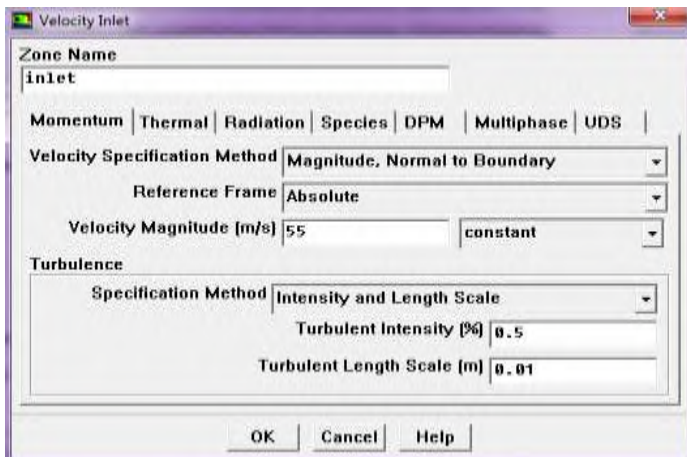
*Operating condition* menggunakan kondisi STP (*Standard Temperatur and Pressure*). 1 atm (101325 Pa)

e. Boundary Condition

*Boundary condition* merupakan penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun kondisi batas turbulen pada *inlet* dan *outlet*. *Inlet* merupakan sisi aliran masuk, yang didefinisikan sebagai *velocity inlet (uniform velocity)*.

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} h}{\mu} \quad (3.1)$$

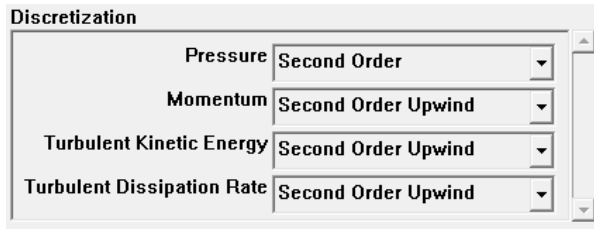
Dengan memberikan  $Re = 3.8 \times 10^4$  dan nilai  $h = 0.01$  maka didapat nilai  $U_{\infty} = 55$  m/s. Dinding saluran dan benda uji didefinisikan sebagai *wall* dan simetri. *Outlet* didefinisikan sebagai *outflow*.



Gambar 3.4 *Boundary condition* pada sisi *inlet*

f. Solution

*Solution* pada penelitian ini akan menggunakan *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.



Gambar 3.5 Diskritisasi untuk *pressure*, *momentum*, *TKE*, *TDR*

g. Initialize

Merupakan langkah perhitungan untuk mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi, *initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

h. Monitoring Residual

Monitoring Residual adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi untuk nilai continuity ditetapkan sebesar  $10^{-6}$ , artinya proses iterasi dinyatakan konvergen setelah residualnya mencapai harga dibawah  $10^{-6}$ .

continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
z-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
k	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
epsilon	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06

Gambar 3.6 Monitoring residual (kriteria konvergen)

i. Iterasi

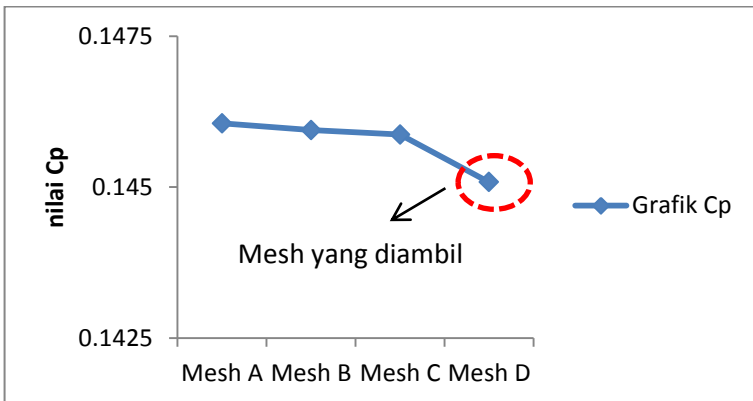
Iterasi adalah langkah untuk melakukan perhitungan pada fluent 6.3.26, diperlukan proses iterasi sampai menghasilkan solusi yang konvergen.

j. Grid Independensi

Untuk mendapatkan ketepatan data pada langkah *post processing*, perlu dilakukan *grid independency*. Grid Independensi dapat menentukan tingkat serta struktur grid terbaik dan paling efisien agar hasil pemodelan mendekati data eksperimen.

Tabel 3.2 Hasil *grid independensi* pemodelan tanpa *bump*

No	MESH	FACE	Cp	Cp eksperimen
1	Mesh A	2122750	0.146054	0.11889
2	Mesh B	2543745	0.145943	
3	Mesh C	3095400	0.145869	
4	Mesh D	3576000	0.145083	



Gambar 3.7 Grafik *grid independency*

Berdasarkan tabel 3.2 mesh A merupakan meshing yang paling renggang dengan jumlah *surface* 2122750, sedangkan mesh D merupakan meshing yang paling rapat dengan jumlah *surface* 3576000. Grafik diatas menjelaskan perbandingan antara

*Coefficient Pressure* dengan jumlah *surface* pada benda uji. Nilai  $C_p$  ini diambil pada titik ( $L = 28h$ ) bagian *downstream*. Grafik memperlihatkan trend yang turun, namun berbeda pada mesh d yang memperlihatkan penurunan yang sangat curam dan lebih mendekati  $C_p$  eksperimen dari pada mesh yang lain. Ini membuktikan bahwa semakin rapat meshing maka akan memberikan tingkat ketelitian yang semakin baik, sehingga dipilihlah jumlah *surface* 3500000 untuk penelitian benda uji yang menggunakan *bump*.

Selain membandingkan dengan grafik  $C_p$ , validasi juga membandingkan dengan data panjang titik *reattachment* yang didapat dari simulasi dengan data eksperimen. Panjang dari tiap-tiap meshing didapat dengan menginterpolasi data *wall shear stress* pada daerah *lower wall* yang didapat dari program fluent. Nilai yang diambil adalah pada saat terjadi perubahan nilai dari negatif menjadi positif. Dari tabel 3.3 dapat dilihat bahwa mesh D memiliki error yang kecil yaitu 13.232 % dari meshing yang dibuat, berarti nilainya lebih mendekati hasil eksperimen.

Tabel 3.3 Perbandingan jarak *reattachment*

MESH	SIMULASI	EKSPERIMEN	ERROR %
MESH A	5.413	6.25	13.392
MESH B	5.417		13.327
MESH C	5.421		13.265
MESH D	5.423		13.232

#### k. Post Processing

Post processing merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh. Hasilnya akan ditampilkan berupa data kuantitatif dan data kualitatif.

##### ➤ Data kuantitatif :

- ✓ Grafik profil kecepatan
- ✓ Grafik intensitas turbulensi
- ✓ Grafik  $C_p$  fungsi ( $x/h$ )
- ✓ Grafik  $C_f$  fungsi ( $x/h$ )



- Data kualitatif :
  - ✓ Kontur
    - Kecepatan
    - Intensitas turbulensi
    - tekanan
  - ✓ Vektor kecepatan
  - ✓ Pathline kecepatan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

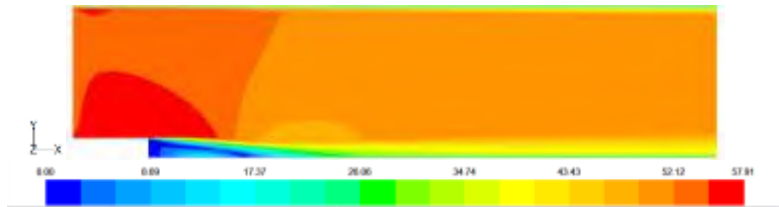
Bab ini akan menjelaskan mengenai analisa dan pembahasan hasil simulasi numerik *backward facing step* tanpa menggunakan *bump* dan dengan penambahan *bump* berupa *circular bump*. Dari hasil yang didapatkan, nantinya akan dibandingkan bagaimana pengaruh yang ditimbulkan dari penambahan *circular bump*. *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar  $3.8 \times 10^4$ . Data yang diperoleh dari hasil simulasi berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik, yaitu profil kecepatan, distribusi *skin friction* ( $C_f$ ), distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ). Sedangkan data kualitatif dipresentasikan dalam bentuk visualisasi aliran. Visualisasi ini bertujuan untuk memperjelas hasil yang didapatkan dari data kuantitatif, yaitu berupa kontur kecepatan, vektor kecepatan, kontur intensitas turbulensi, dan kontur tekanan statis.

### **4.1 Analisa aliran *backward facing step* tanpa *circular bump***

Sebelum membahas analisa aliran *backward facing step* dengan penambahan *circular bump* terlebih dahulu akan dibahas fenomena yang terjadi pada aliran *backward facing step* tanpa *bump*. Fenomena aliran *backward facing step* tanpa *bump* ini akan ditampilkan dengan beberapa data yang nantinya akan menjadi pembandingan pada benda uji *backward facing step* dengan penambahan *bump*. Data kualitatif akan ditampilkan berupa visualisasi aliran yang terjadi pada aliran yang mengalir pada pemodelan *backward facing step*. Kemudian data kuantitatif yang akan ditampilkan berupa grafik profil kecepatan, distribusi *skin friction* ( $C_f$ ), dan distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ).

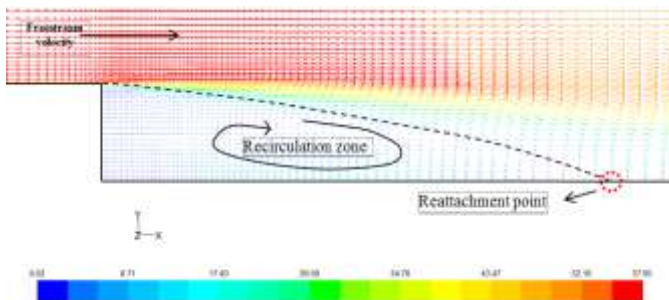
Gambar 4.1 merupakan tampilan kontur kecepatan dari pemodelan geometri *backward facing step* tanpa *bump*. *Grade* warna merah menunjukkan kecepatan maksimum yang melintasi

saluran *backward facing step* dan warna biru merupakan kecepatan minimum.



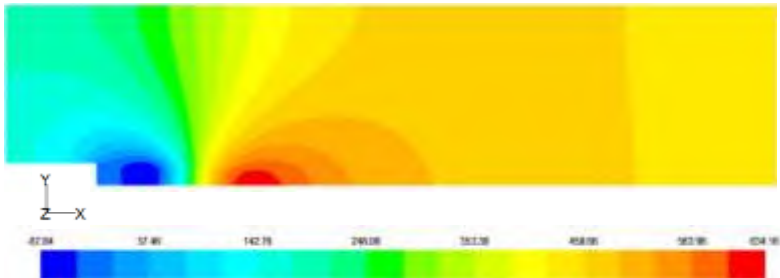
Gambar 4.1 Visualisasi kontur kecepatan pada saluran *backward facing step*

Harga kecepatan maksimum yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 adalah sebesar 57.91 m/s dan kecepatan minimumnya adalah 0 yang terdapat pada area didekat *facing step* bagian bawah. Area yang berwarna biru menginformasikan bahwa terjadinya separasi. Separasi ini merupakan kerugian energi. Aliran akan kembali pulih setelah terjadi transfer energi antara aliran yang berada pada daerah yang tidak terseparasi menuju daerah separasi. Pulihnya aliran ini ditandai dengan telah positifnya seluruh nilai profil kecepatan. Titik awal positifnya nilai profil kecepatan sering disebut sebagai titik *reattachment*. Jarak titik *reattachment* yang terjadi pada pemodelan geometri *backward facing step* tanpa *bump* adalah pada  $x/h = 5.423$ . Jarak ini diukur mulai dari *step* hingga telah positifnya semua nilai profil kecepatan. Dapat dilihat gambar yang terdapat dibawah ini.



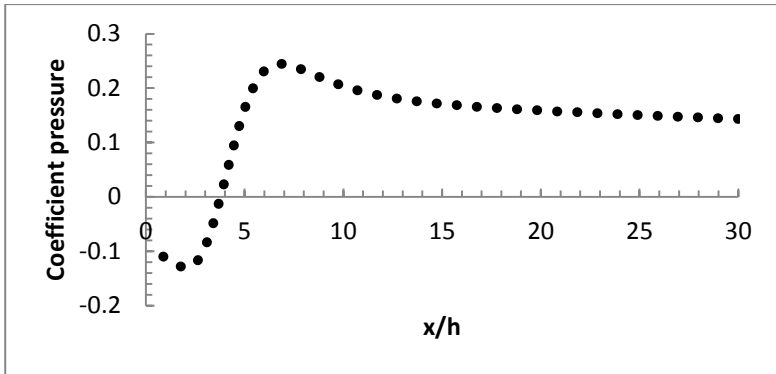
Gambar 4.2 Titik *Reattachment*

Gambar 4.2 menunjukkan vektor kecepatan pada pemodelan *backward facing step*. Tanda lingkaran merah memperlihatkan aliran mengalami *reattachment*. Titik *reattachment* merupakan awal *boundary layer* akan terbentuk kembali, ditandai dengan profil aliran tidak lagi bernilai negatif. Visualisasi aliran yang berwarna merah merupakan aliran dengan kecepatan *freestream*, sedangkan daerah yang berada dibawah garis hitam putus-putus merupakan daerah resirkulasi aliran, ditandai dengan arah vektor kecepatan yang bernilai negatif. Hal ini menandakan adanya pusaran aliran dengan kecepatan rendah.



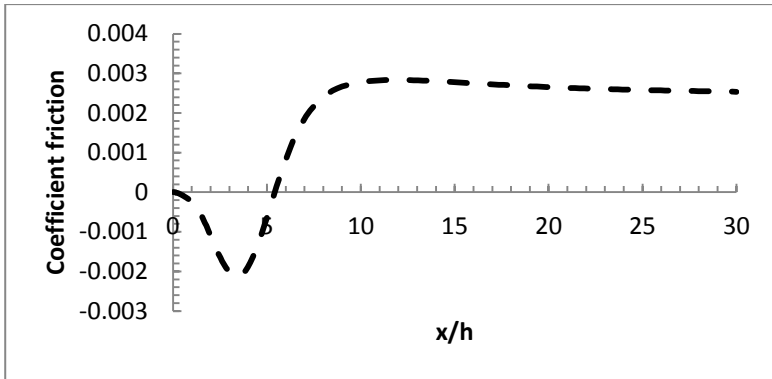
Gambar 4.3 Visualisasi kontur tekanan

Gambar 4.3 merupakan kontur tekanan pada *backward facing step*. Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai  $C_p$  pada pemodelan geometri *backward facing step* yang ditandai dengan *grade* warna yang terbentuk. Terlihat bahwa area setelah *step* mengalami penurunan tekanan yang ditandai dengan warna biru. Kemudian distribusi tekanan mengalami peningkatan searah x yang ditandai dengan perubahan warna yang ditunjukkan dengan warna merah. Berikut ini merupakan grafik distribusi tekanan yang terjadi pada daerah *downstream*.



Gambar 4.4 Grafik *coefficient pressure* ( $C_p$ ) pemodelan tanpa *bump*

Gambar 4.4 merupakan grafik *coefficient pressure* ( $C_p$ ) pemodelan tanpa *bump* pada *lower wall* yang ditampilkan untuk memperjelas hasil visualisasi kontur tekanan pada bagian *downstream*. Perubahan luasan penampang mempengaruhi kecepatan dan tekanan yang terjadi pada penampang *backward facing step*. Kecepatan yang mengalami penurunan pada daerah *diverging area* menyebabkan *pressure drop*. Seperti pada grafik  $C_p$  yang berada diatas,  $C_p$  bernilai negatif pada titik  $x/h = 0$  sampai  $x/h = 3.8$  menandakan bahwa tekanan berada dibawah tekanan *inlet* yaitu dibawah 178 Pa. Nilai  $C_p$  minimum ini ditunjukkan dengan kontur tekanan statik berwarna biru yang harganya sebesar -67.64 Pa. Nilai  $C_p$  nol menandakan nilai tekanan statis sama dengan tekanan *freestream* di *inlet*. Nilai  $C_p$  bernilai maksimum 0.2448 pada  $x/h = 6.8$  dapat dilihat pada gambar 4.3 yang ditampilkan dengan warna merah. Adapun grafik mengalami penurunan dari  $x/h = 0$  sampai  $x/h = 2.3$ , ini menandakan terjadinya percepatan aliran pada permukaan dinding bagian *downstream*. Besarnya *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan geometri *backward facing step* tanpa menggunakan *bump* adalah 455.702 Pa.



Gambar 4.5 Grafik *coefficient friction* ( $C_f$ ) pemodelan tanpa *bump*

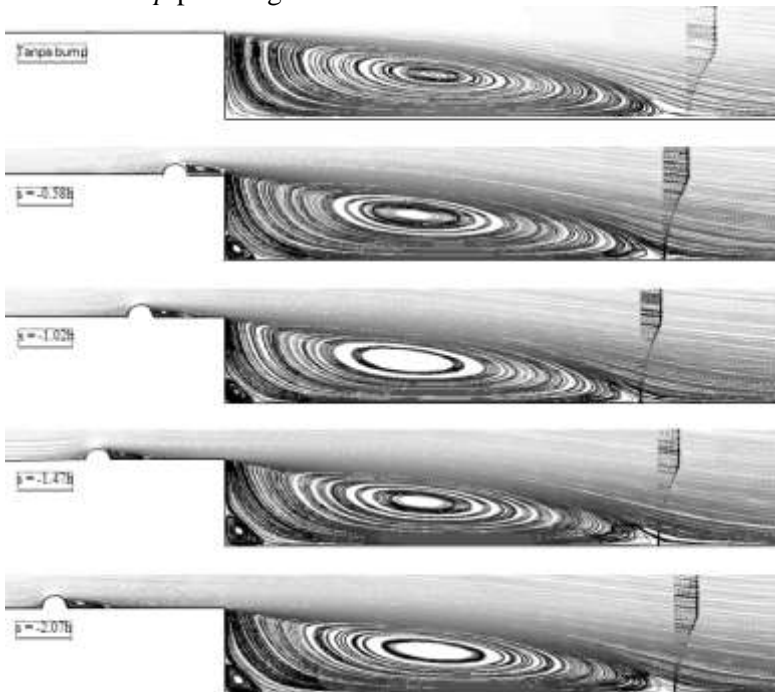
Gambar 4.5 menunjukkan distribusi *skin friction* yang terjadi sepanjang *lower wall* pada daerah *downstream*. Terlihat grafik mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan dan setelah itu konstan. Nilai  $C_f$  yang bernilai negatif dimulai dari  $x/h = 0$  sampai  $x/h = 5.423$ , menandakan aliran mengalami separasi. Adapun nilai  $C_f = 0$  pada  $x/h = 5.423$  menunjukkan titik *reattachment* aliran, karena daerah *lower wall* pada titik  $x/h = 5.423$  memiliki kecepatan nol, ketika nilai  $C_f$  bernilai nol tidak terjadi tegangan geser pada dinding maka nilainya juga nol.

Dari beberapa data *backward facing step* yang didapatkan tadi dapat disimpulkan bahwa *diverging area* menyebabkan separasi aliran. Separasi aliran ini diakibatkan oleh aliran yang tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang terjadi pada daerah *diverging area*. Penambahan bodi pengganggu pada posisi *upstream* berupa *circular bump* diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran, meningkatnya intensitas turbulensi berarti meningkatkan momentum aliran yang mengalir pada penampang *backward facing step* sehingga luas daerah separasi atau panjang titik *reattachment*nya dapat direduksi.

## 4.2 Analisa aliran *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump*

### 4.2.1 Panjang *Reattachment*

Dari hasil simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan jarak *bump* setengah lingkaran, kemudian dibandingkan dengan pemodelan benda uji tanpa *bump* didapatkan hasil berupa panjang *reattachment* yang bisa dilihat pada gambar 4.6. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan dari setiap aliran walaupun perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan. Dari penelitian ini yang akan dianalisa adalah panjangnya titik *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan benda uji sebagai akibat dari pengaruh variasi jarak pengganggu berupa *circular bump* pada bagian *downstream*.



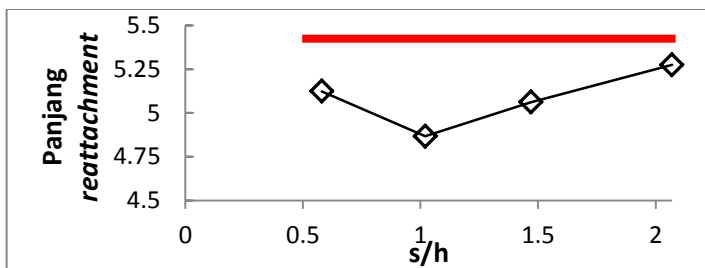
Gambar 4.6 *Resirkulasi* aliran tanpa menggunakan *bump* dan dengan variasi jarak *bump*



Jika dilihat sekilas, gambar 4.6 memperlihatkan panjang *reattachment* yang hampir sama. Variasi jarak *bump* yang semakin ke arah *inlet* juga mempengaruhi peningkatan kecepatan aliran pada puncak *circular bump*. Pada jarak variasi *bump*  $s = -0.58h$  aliran memiliki kecepatan maksimum sebesar 76.93 m/s. Aliran terlebih dahulu terseparasi akibat melewati gundukan setengah lingkaran. Jarak separasi yang sangat dekat dengan *step* memberikan pengaruh pada separasi yang terjadi selanjutnya pada bagian *downstream*. Hal ini dipengaruhi oleh belum stabilnya aliran akibat separasi yang terjadi pada saat melewati *circular bump* langsung melewati perbedaan penampang. Pada variasi jarak *bump*  $s = -0.58h$  bisa mengurangi panjang *reattachment* sebesar 5.5%. Simulasi jarak *bump* yang lain dengan  $s = -1.02h$ ,  $-1.47h$ , dan  $-2.07h$  terletak agak jauh dari *step* sehingga memberi ruangan untuk terjadinya *reattachment* ketika melewati *circular bump*. Panjang *reattachment* dan panjang reduksi yang dihasilkan dari tiap-tiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan jarak *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan

Variasi $s/h$	panjang <i>reattachment</i>	Tanpa Bump	Reduksi (%)
0.58	5.123	5.423	5.526
1.02	4.866		10.264
1.47	5.062		6.665
2.07	5.275		2.737



Gambar 4.7 Grafik panjang *reattachment*

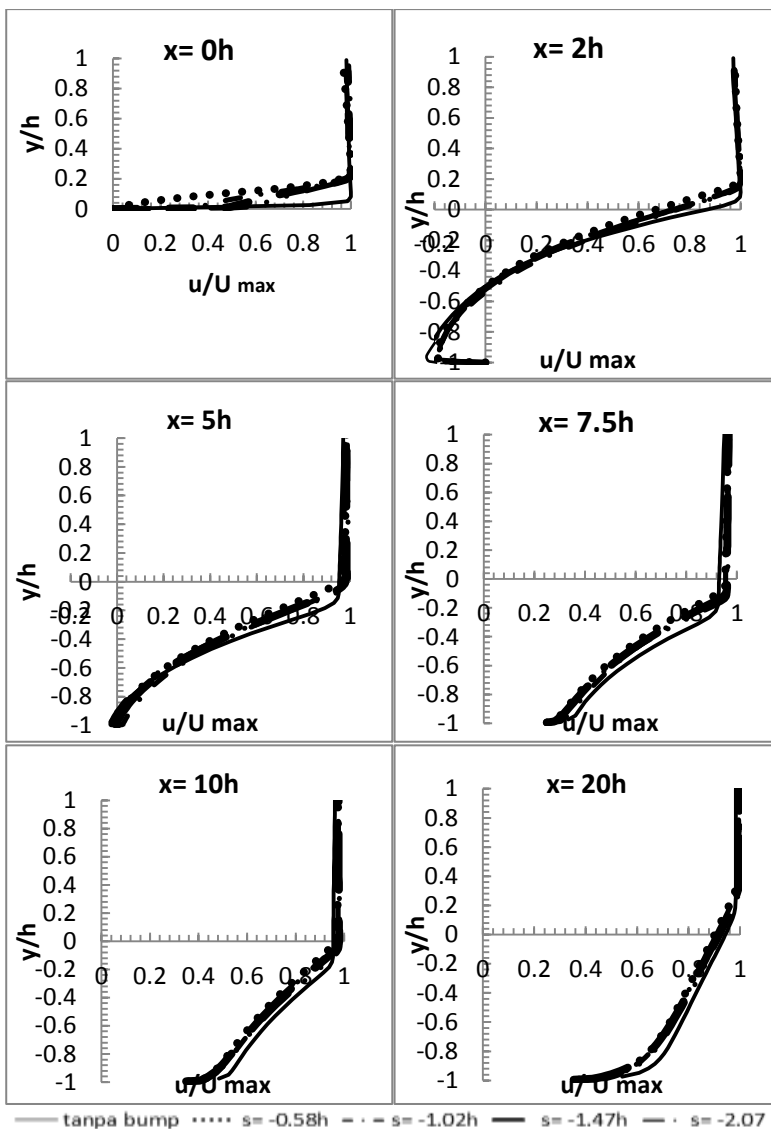
Hasil rekayasa pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan  $Re\ 3.8 \times 10^4$  memperlihatkan bahwa pada jarak *bump*  $s = -1.02h$  terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 10 %. Pada jarak *bump*  $s = -0.58h$ ,  $-1.47h$ , dan  $-2.07h$  terjadi pengurangan panjang *reattachment* sebesar 5.5% , 6.6% , dan 2.7%.

Hasil yang paling efektif untuk mengurangi panjang *reattachment* pada simulasi yang dilakukan adalah pada jarak *bump*  $s = -1.02h$  dimana persentase pengurangan jarak *reattachment* sebesar 10%.

#### 4.2.2 Distribusi Profil Kecepatan

Penurunan nilai kecepatan seiring dengan perubahan jarak dalam suatu pemodelan *backward facing step* dikarenakan bentuk geometri yang mengembang secara tiba-tiba, sehingga mengakibatkan aliran balik (*back flow*). Penambahan *bump* bertujuan untuk mengganggu aliran yang melewati penampang *backward facing step*, terganggunya aliran diharapkan dapat meningkatkan intensitas turbulensi aliran sehingga dapat meningkatkan momentum aliran. Momentum aliran yang nantinya akan mempengaruhi panjang *reattachment*. Profil kecepatan yang akan dibahas lebih kepada bagian *downstream* pemodelan. Berikut adalah gambar profil kecepatan pada *cross section*  $x = 0h, 2.5h, 5h, 7.5h, 10h, 20h$ .

Gambar 4.8 masing-masing menunjukkan perubahan profil kecepatan dari tiap-tiap *cross section* yang telah ditentukan. Adanya profil kecepatan dapat memperlihatkan daerah yang terseparasi pada *cross section* yang telah ditentukan. Profil kecepatan disajikan dalam bentuk grafik tak berdimensi ( $y/h$ ) dan fungsi kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{max}$ ) pada jarak yang tak berdimensi.  $u/U_{max}$  merupakan perbandingan antara setiap kecepatan lokal pada sebuah *cross section*  $x/h$  dengan nilai  $U_{max}$  pada *cross section* tersebut.



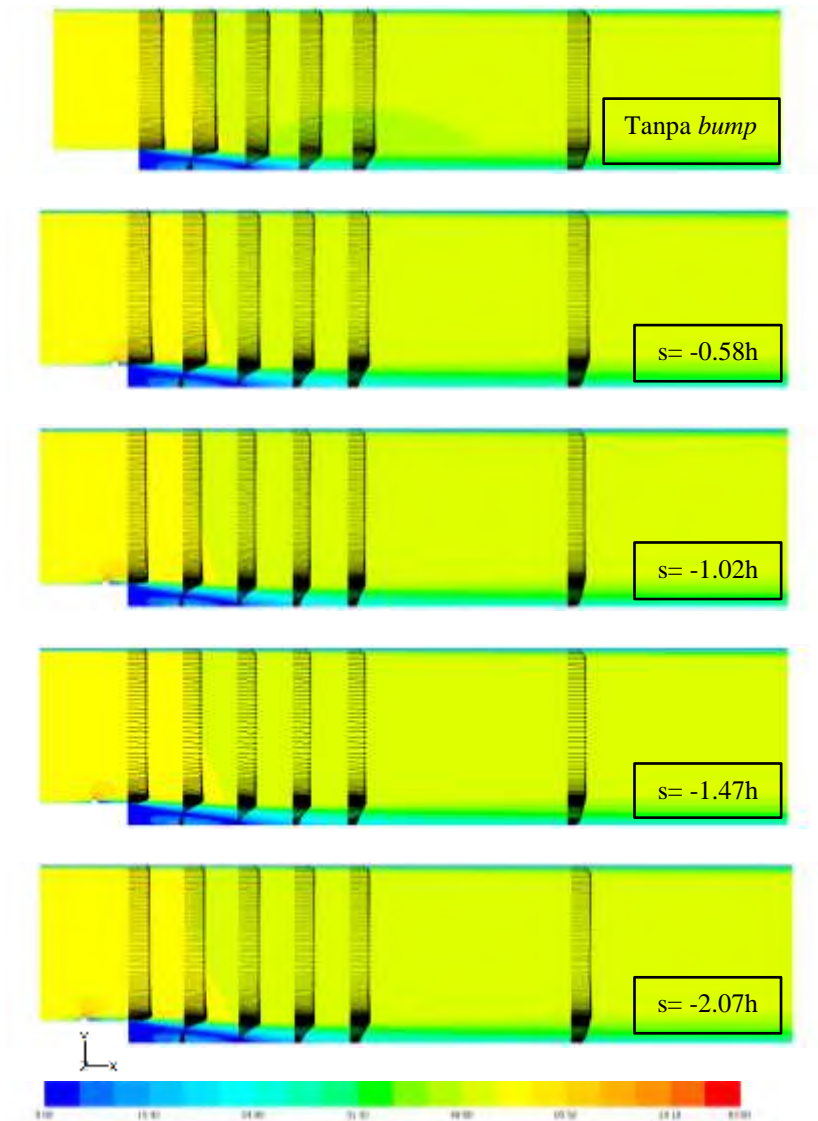
Gambar 4.8 Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/h$ , model *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump*

Aliran yang mengalir pada sisi *upstream* pemodelan geometri akan mengalami penebalan *boundary layer* sampai pada posisi *cross section*  $x = 0h$  (disaat posisi *step*). Aliran pada pemodelan tanpa *bump* memperlihatkan profil kecepatan sudah berkembang namun pada pemodelan dengan menggunakan *bump* profil kecepatan memperlihatkan belum terjadi perkembangan aliran. Hal ini disebabkan oleh penambahan pengganggu berupa *bump*, sehingga aliran mengalami ketidak stabilan dan menyebabkan profil kecepatan belum berkembang penuh.

Distribusi profil kecepatan yang ditunjukkan pada *cross section*  $x = 2.5h$  memperlihatkan grafik terjadinya separasi yang ditandai dengan nilai negatif. Separasi disebabkan oleh tidak mampunya momentum aliran melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi pada bentuk penampang yang mengalami pelebaran secara tiba-tiba. Aliran akan kembali pulih pada posisi tertentu setelah terjadi transfer energi antara aliran yang berada didaerah yang tidak terseparasi menuju aliran yang berada didaerah terseparasi.

Distribusi profil kecepatan pada *cross section*  $x = 5h$  memperlihatkan masih terdapat beberapa aliran yang masih memiliki nilai negatif, ini menandakan bahwa aliran masih mengalami separasi. Namun pada profil kecepatan pemodelan geometri jarak *bump*  $s = -1.02h$ , aliran sudah bernilai positif. Hal ini menandakan pada pemodelan  $s = -1.02h$  sudah melewati titik *reattachment*. *Cross section*  $x = 7.5h$  dan  $x = 10h$  memperlihatkan distribusi profil kecepatan semua aliran sudah bernilai positif. Aliran pada *cross section*  $x = 7.5h$  dan  $10h$  sudah mulai berkembang disebabkan telah hilangnya pengaruh separasi yang terjadi. Distribusi profil kecepatan pada *cross section*  $x = 20h$  sudah memperlihatkan aliran berkembang penuh.

Fenomena aliran yang terjadi didalam pemodelan *backward facing step* secara detail juga dapat divisualisasikan dengan metode numerik berupa tampilan kontur dan vektor kecepatan. Gambar distribusi kecepatan yang ditampilkan merupakan perpotongan dari bidang potong sumbu  $z$  dan pengambilan data berdasarkan *cross section* yang telah ditentukan



Gambar 4.9 Visualisasi kontur kecepatan model *backward facing step* tanpa dan dengan penambahan *bump*

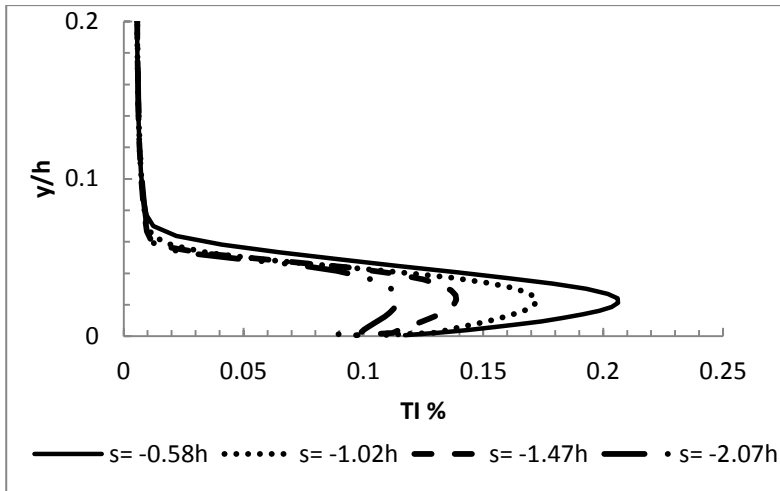
Fenomena aliran melewati pemodelan dapat dibedakan dengan membaca rentang warna yang tertera dibawah pemodelan benda uji. Posisi *inlet* bagian tengah berwarna kuning menandakan kecepatan *freestream*. Warna merah menandakan terjadi kenaikan kecepatan. Pada daerah *diverging*, terjadi penurunan kecepatan yang ditandai dengan warna biru berkisar rentang 0 sampai 12. Kontur kecepatan berwarna biru memberitahukan bahwa aliran mengalami separasi. Visualisasi kontur kecepatan ini menginformasikan tingkat kecepatan aliran yang mengalir pada penampang *backward facing step* dan besar luasan separasi yang terjadi pada penampang.

#### 4.2.3 Distribusi Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi adalah bilangan tak berdimensi yang dipengaruhi oleh standar deviasi kecepatan aliran dan kecepatan rata-rata fluida. Intensitas turbulensi merupakan suatu skala yang disajikan dalam persentase tersusun atas tiga kecepatan arah aliran yaitu kecepatan aliran kearah aksial, radial, dan tangensial. Apabila nilai standar deviasi kecepatan aliran semakin besar maka intensitas turbulensi semakin besar, dan sebaliknya apabila kecepatan rata-rata fluida semakin besar, nilai intensitas turbulensi yang terjadi akan semakin kecil.

Penambahan *circular bump* pada sisi *upstream* dapat meningkatkan intensitas turbulensi. Meningkatnya intensitas turbulensi akan meningkatkan momentum aliran. Meningkatnya momentum aliran diharapkan dapat melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi pada penampang *backward facing step*.

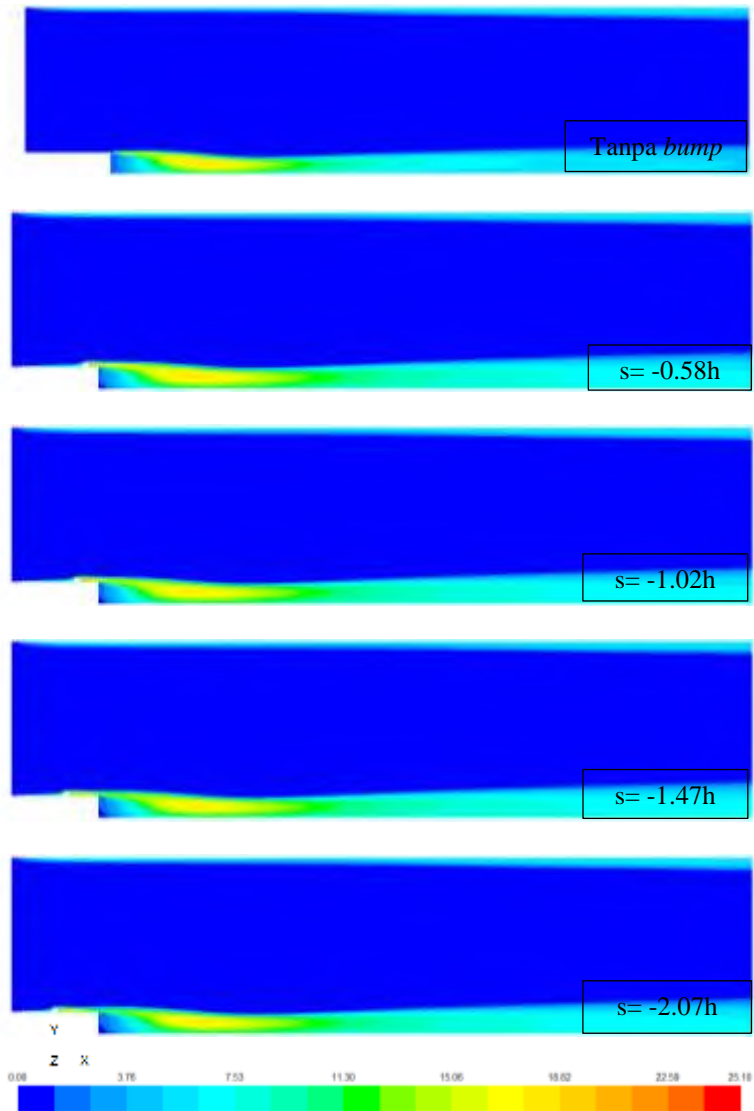
Profil intensitas turbulensi merupakan profil yang terbentuk berlawanan dengan profil kecepatan. Gambar 4.10 menampilkan perbandingan intensitas turbulensi yang terjadi dari tiap-tiap variasi jarak *bump* pada *cross section*  $x = 0h$  (pada bagian *step*).



Gambar 4.10 Perbandingan grafik intensitas turbulensi pada *cross section*  $x = 0h$

Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan grafik intensitas turbulensi yang menjelaskan bahwa intensitas turbulensi pada variasi jarak *bump*  $s = -0.58h$  memiliki grafik yang lebih panjang. Hal ini dikarenakan letak *bump*  $s = -0.58h$  memiliki jarak yang lebih dekat ke daerah *step* sehingga intensitas turbulensinya masih besar. Sebaliknya untuk variasi jarak *bump*  $s = -2.07h$  memperlihatkan tren yang paling pendek dari pada pemodelan geometri yang lain. Hal ini dikarenakan letak jarak *bump* yang jauh dari titik pengambilan data yaitu bagian *step*. Pendeknya intensitas turbulensi pada variasi jarak  $s = -2.07h$  dipengaruhi oleh jauhnya jarak antara pengambilan data dengan *step* dari pemodelan yang lain.

Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan. Intensitas turbulensi ditunjukkan dengan oleh *grade* warna yang terbentuk dari simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.11 Visualisasi kontur intensitas turbulensi tanpa dan dengan penambahan *bump*



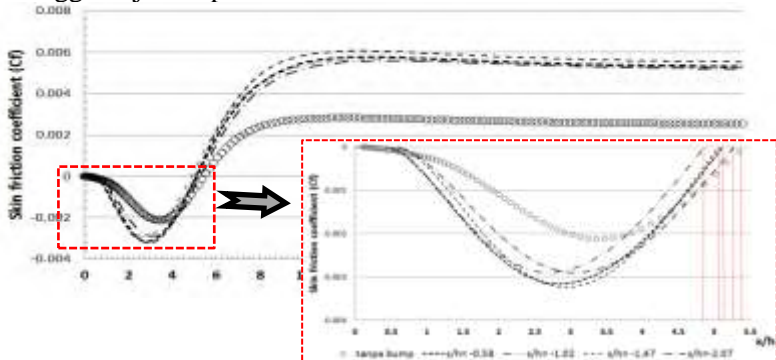
Gambar 4.11 menunjukkan visualisasi intensitas turbulensi yang terjadi dari tiap-tiap pemodelan *backward facing step*. Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan *backward facing step* yang ditunjukkan dengan perbedaan *grade* warna. Penambahan pengganggu berupa *bump* akan menyebabkan intensitas turbulensi semakin meningkat. Seiring meningkatnya intensitas turbulensi maka semakin meningkat pula momentum aliran pada dinding pemodelan geometri. Harapannya dengan semakin meningkatnya momentum aliran, aliran akan mampu melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi, sehingga separasi dapat diminimalisir.

Turbulensi aliran merupakan salah satu sifat fluida yang menunjukkan fluktuasi aliran, dimana gambar 4.11 visualisasi kontur intensitas turbulensi ini menunjukkan seberapa besar tingkat intensitas turbulensi yang terjadi pada pemodelan. Pada pemodelan *backward facing step* tanpa menggunakan *bump* terlihat bahwa tingkat intensitas turbulensi maksimalnya adalah 21.06. Pada pemodelan dengan variasi jarak *bump*  $s = -0.58h$  memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi maksimumnya adalah 23.92. Kemudian untuk variasi jarak  $s = -1.02h$  yang memberikan titik *reattachment* yang paling pendek memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi maksimumnya adalah 24.01 dan pada variasi jarak  $s = -2.07h$  memperlihatkan tingkat intensitas turbulensi yang semakin besar dengan nilai maksimum 25.10. Hal ini menandakan semakin jauh jarak pengganggu dari *step*-nya atau semakin mendekati posisi *inlet*, maka tingkat intensitas turbulensinya semakin besar.

Dari hasil visualisasi dapat diketahui bahwa yang memiliki nilai intensitas turbulensi yang paling besar adalah variasi jarak  $s = -2.07h$ , sedangkan yang memiliki nilai intensitas turbulensi paling kecil dari penambahan *circular bump* terdapat pada pemodelan geometri dengan jarak  $s = -0.58h$ .

#### 4.2.4 Coefficient Friction (Cf)

Besarnya *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) erat kaitannya dengan besarnya tegangan geser dinding ( $\tau_w$ ). Geometri *backward facing step* identik dengan perubahan penampang yang melebar sehingga aliran yang mengalir didalamnya akan memperoleh pengaruh dari *adverse pressure gradient* yang besar. Turunya nilai  $C_f$  dimulai dari nol mengindikasikan terjadinya separasi aliran yang dipengaruhi *adverse pressure gradient* sehingga terjadi penebalan *boundary layer*, akibatnya aliran didekat *diverging wall* akan mengalami defisit momentum sehingga terjadi separasi.



Gambar 4.12 Perbandingan grafik  $C_f$  tanpa *bump* dan dengan menggunakan *bump*

Gambar 4.12 menunjukkan distribusi  $C_f$  pada *wall* model *backward facing step* dengan *reynolds number*  $3.8 \times 10^4$  tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump* pada bagian *downstream*. Keseluruhan fenomena grafik  $C_f$  dari tiap-tiap pemodelan memiliki tren yang relatif sama. Perbandingan pemodelan geometri *backward facing step* yang menggunakan *bump* dan tanpa menggunakan *bump* sama-sama dimulai dari nilai  $C_f = 0$ , ini menunjukkan terjadinya separasi aliran pada area *diverging*.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa apabila ditarik garis dari nilai nol pada koordinat  $y$  kearah horizontal maka akan didapatkan panjang *reattachment* dari tiap-tiap pemodelan

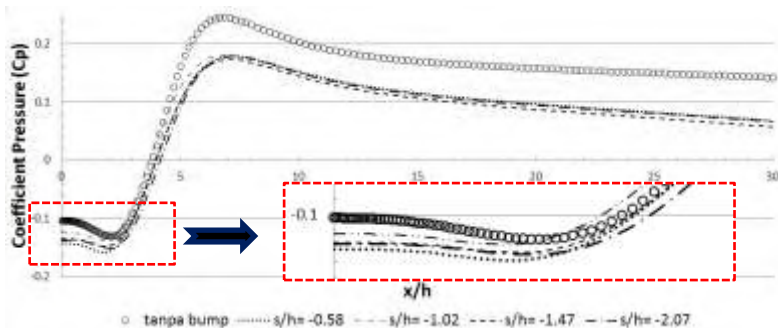
geometri, dimana pemodelan dengan jarak *bump*  $s = -1.02h$  memiliki jarak *reattachment* yang paling pendek, kemudian diikuti dengan pemodelan dengan jarak *bump*  $s = -1.47h$ ,  $-0.58h$ , dan terakhir  $-2.07h$ . Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan data hasil yang didapat dari panjang *reattachment* pada tabel 4.1.

#### 4.2.5 Coefficient of Pressure ( $C_p$ )

*Pressure coefficient* merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang dapat mempresentasikan aliran didalam pipa. Data koefisien tekan diambil pada bagian *downstream* pemodelan geometri *backward facing step*. Aliran pada mulanya akan mengalami percepatan yang ditandai dengan penurunan grafik akibat *favorable pressure gradient*. Setelah itu mengalami perlambatan yang ditandai dengan kenaikan sangat tajam diakibatkan oleh aliran yang tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* pada saat penampang mengembang dengan tiba-tiba sehingga aliran terseparasi. Separasi akan berangsur normal dan akhirnya akan hilang, ini disebabkan karena adanya transfer energi antara aliran yang berada didaerah yang tidak terseparasi menuju aliran yang berada didaerah terseparasi sehingga aliran yang terseparasi akan berangsur-angsur kembali normal.

Pada gambar 4.13 grafik perbandingan  $C_p$  tanpa *bump* dan dengan penambahan *bump* dibawah dapat dilihat bahwa nilai koefisien tekan yang didapatkan dari simulasi ini memiliki tren yang sama, namun memiliki nilai yang berbeda-beda. Tekanan statis mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan yang sangat tajam yang diakibatkan aliran yang mengembang dengan tiba-tiba, sehingga terjadi *adverse pressure gradient* yang membuat aliran terseparasi. Penambahan *circular bump* pada sisi *upstream* bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi pada aliran. Akibat meningkatnya intensitas turbulensi, momentum aliran yang berada pada dinding akan mengalami peningkatan. Momentum aliran yang lebih tinggi ini diharapkan mampu untuk melawan *adverse pressure gradient* pada penampang yang melebar secara tiba-tiba, sehingga separasi yang

terjadi dapat ditunda. Aliran akan kembali normal setelah terjadi transfer energi antara aliran yang terseparasi dengan aliran yang tidak terseparasi.



Gambar 4.13 Grafik perbandingan *Coefficient of pressure* dari tiap pemodelan

Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa dengan penambahan *circular bump* pada posisi *upstream* dapat menurunkan *pressure drop* yang terjadi pada pemodelan geometri *backward facing step*. Tabel 4.2 merupakan hasil perbandingan *pressure drop* yang terjadi pada tiap-tiap pemodelan. Nilai *pressure drop* yang paling kecil terdapat pada model benda uji  $s = -1.02h$  sebesar 354.862 dan nilai *pressure drop* yang paling besar terdapat pada penambahan bodi pengganggu dengan jarak  $s = -0.58h$  sebesar 392.202.

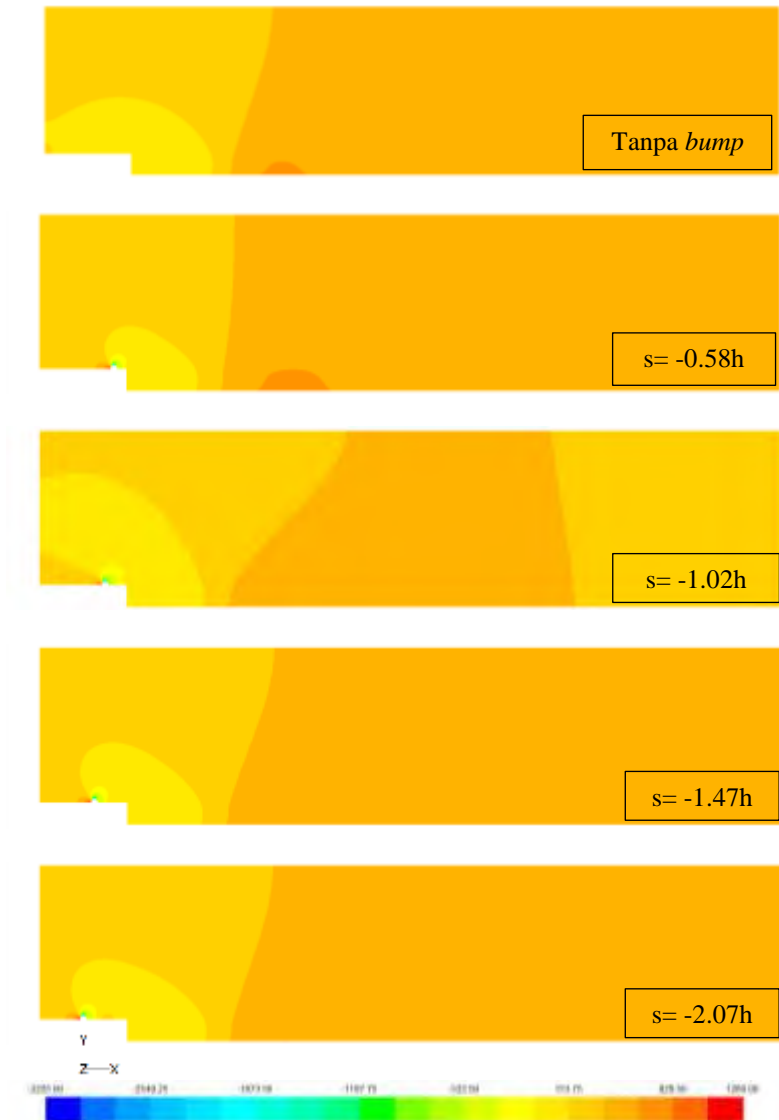
Tabel 4.2 Perbandingan nilai *pressure drop* dari tiap-tiap pemodelan

no	variasi $s/h$	Cp total	Pressure Drop
1	tanpa bump	0.2460	455.703
2	-0.58	0.2117	392.202
3	-1.02	0.1915	354.862
4	-1.47	0.1931	357.792
5	-2.07	0.2035	376.962

Jadi, dari data yang didapatkan bahwa pemodelan geometri dengan penambahan *bump* dapat mereduksi *pressure drop* yang terjadi pada penampang *backward facing step*. Dari hasil simulasi yang dilakukan variasi jarak penambahan *bump* pada  $s = -1.02h$  merupakan jarak yang paling efektif mengurangi *pressure drop* yang terjadi.

Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan harga  $C_p$  yang ditunjukkan dengan *grade* warna yang terbentuk. Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan tekanan statis yang terjadi pada pemodelan geometri tanpa dan dengan penambahan *bump*.

Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan tekanan statis tanpa dan dengan penambahan *bump*. Dari simulasi variasi jarak *bump* yang dilakukan didapatkan nilai tekanan statis pada variasi jarak *bump*  $s = -1.02h$  memiliki tekanan statis yang paling kecil. Sedangkan tekanan statis yang paling besar terdapat pada variasi jarak *bump*  $s = -0.58h$  untuk bagian *downstream*. Semakin kecil nilai tekanan statis maka harga  $C_p$  juga akan kecil. Sebaliknya jika nilai tekanan statis besar maka harga  $C_p$  juga akan besar. Faktor yang mempengaruhi nilai  $C_p$  pada pemodelan *backward facing step* adalah posisi jarak penambahan *bump*. Posisi jarak penambahan *bump* akan berpengaruh pada peningkatan intensitas turbulensi aliran. Turbulensi aliran akan membuat momentum aliran semakin meningkat. Hal ini bertujuan agar aliran dapat melawan *adverse pressure gradient* pada penampang yang mengembang secara tiba-tiba sehingga dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi pada saluran *backward facing step*.



Gambar 4.14 Visualisasi tekanan statis pada pemodelan geometri tanpa dan dengan penambahan *bump*

#### 4.2.6 Shape Factor

*Shape factor* merupakan perbandingan antara *displacement thickness* dengan *momentum thickness* yang sangat berpengaruh nantinya pada suatu aliran. Diketahui bahwa, untuk *boundary layer* aliran turbulen, nilai *shape factor* meningkat dari 1.3 untuk gradien tekanan nol sampai sekitar 2,5 pada *separation*. Untuk aliran Laminar dengan gradien tekanan nol,  $H = 2.6$  dan *separation*  $H = 3.5$ . (fox, et,al 2004).

Nilai *shape factor* sangat dipengaruhi oleh nilai *momentum thickness*, jika nilai *momentum thickness*nya besar akan mendapatkan nilai *shape factor* yang kecil. Hal ini menandakan aliran semakin turbulen. Dari hasil analisa numerik yang dilakukan maka didapatkan data yang dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 Perbandingan nilai *shape factor* dengan panjang *reattachment*

no	benda uji	H	panjang reattachment
1	tanpa bump	2.159	5.423
2	-0.58	4.386	5.123
3	-1.02	2.015	4.866
4	-1.47	1.665	5.062
5	-2.07	1.497	5.275

Tabel 4.3 diatas merupakan hasil perbandingan nilai *shape factor* yang didapatkan dari simulasi numerik. Tabel ini memberikan data seberapa turbulennya aliran yang dihasilkan dari penambahan bodi pengganggu. Meningkatnya turbulensi aliran akan berpengaruh pada peningkatan momentum aliran. Momentum aliran yang meningkat akan menyebabkan separasi dapat tertunda. Pemodelan geometri tanpa menggunakan *bump* memiliki harga *shape factor* 2.159 dengan panjang *reattachment* 5.423. Pemodelan geometri dengan jarak *bump*  $s = -0.58h$  memiliki harga *shape factor* = 4.386 dengan panjang *reattachment* 5.123, nilai *shape factor* pada pemodelan  $s = -0.58h$

melewati rentang aliran turbulen, fenomena ini disebabkan karena pada titik pengambilan data *shape factor* masih berada pada daerah separasi. Hal ini membuat nilai *shape factor*nya menjadi lebih besar. Pemodelan geometri variasi jarak *bump*  $s = -1.02h$  dengan nilai *shape factor* 2.015 memiliki panjang *reattachment* yang lebih pendek yaitu 4.866. Kemudian, untuk pemodelan geometri dengan jarak *bump*  $s = -1.47h$  memiliki harga *shape factor* = 1.665 dengan panjang *reattachment* sejauh 5.06, dan yang terakhir, untuk geometri dengan jarak *bump*  $s = -2.07h$  memiliki harga *shape factor* = 1.497 dengan jarak *reattachment*nya sejauh 5.27.

Hasil yang didapatkan dari hasil simulasi menyatakan bahwa untuk *shape factor* 2.015 pada variasi  $s = -1.02h$  memberikan panjang *reattachment* yang lebih pendek. Berbanding terbalik dengan hasil yang didapatkan pada variasi jarak *bump*  $s = -2.07h$  dengan harga *shape factor* = 1.497 memberikan panjang *reattachment* yang lebih panjang.

Jadi, dapat disimpulkan bahwa tidak ada korelasi antara semakin meningkatnya turbulensi aliran dengan panjang *reattachment* pada saluran *backward facing step*.



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan mengenai karakteristik aliran didalam *backward facing step* dengan *reynolds number*  $3.8 \times 10^4$  dan variasi jarak *bump* maka didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya :

1. Penambahan *bump* pada bagian sisi *upstream* sangat berpengaruh terhadap peningkatan intensitas turbulensi aliran. Pengujian variasi jarak *bump* yang paling efisien untuk mengurangi titik *reattachment* pada pengujian yang dilakukan adalah pada jarak  $s = -1.02h$ , yang memberikan hasil jarak *reattachment* yang paling pendek yaitu 4.866, pengurangan sebesar 10%.

Variasi s/h	panjang <i>reattachment</i>	Tanpa Bump	Reduksi (%)
-0.58	5.123	5.423	5.526
-1.02	4.866	5.423	10.264
-1.47	5.062	5.423	6.665
-2.07	5.275	5.423	2.737

2. *Skin friction coefficient* yang didapatkan dari pengolahan numerik memberikan data tentang tegangan geser yang terjadi pada permukaan geometri. *Skin friction coefficient* pada bagian dinding juga sangat mempengaruhi jarak *reattachment*. Sehingga dari grafik pada pembahasan *Coefficient Friction* dapat dilihat bahwa dengan menarik garis sejajar dengan nol pada sumbu y ordinat secara horizontal maka akan didapatkan jarak *reattachment* dari pengujian yang dilakukan.
3. Penambahan bodi pengganggu pada posisi *upstream channel* dapat mengurangi *pressure drop* yang terjadi dalam pemodelan *backward facing step*.

4. Daerah yang masih terkena efek separasi memberikan nilai *pressure drop* yang besar.
5. Tidak terdapat korelasi antara meningkatnya intensitas turbulensi dengan panjang *reattachment* yang terjadi.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat bermanfaat sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini belum dilakukan secara eksperiment sehingga cukup sulit untuk membandingkan hasil yang dapat divalidasi secara aktual. Hasil eksperiment sangat membantu untuk memvalidasi data yang didapatkan pada simulasi numerik.
2. Melakukan penelitian dengan variasi *reynolds number* dan variasi rasio ekspansi dengan penambahan *bump* agar didapatkan data yang lebih akurat dan dapat dipertimbangkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Armaly, B.F., Durst, F., Peraira, (1983). **Experimental and theoretical investigation of backward facing step flow**. Journal of Fluid Mechanic.
- Badran, O.O., Bruun, H.H., 1998. **Effect of inlet conditions on flow over backward facing step**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic.
- Biswas, G., M. Breuer, dan F. Durst. 2004. **Backward-Facing step Flow for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynold Numbers**. Germany : Universitat Erlangen-Nurnberg Cauerstr.
- Fluent Inc., 2006, *FLUENT 6.3 Tutorial Guide*, Fluent Inc., Lebanon.
- Fluent Inc., 2007, *GAMBIT 2.4 User's Guide*, Fluent Inc., Lebanon.
- Fox, R. W., Mc Donald, A. T. dan Pritchard, P. J. 2010. **Introduction to Fluid Mechanics**, 7<sup>th</sup> edition. New York : Jhon Wiley and Sons.
- Harinaldi, Damora Rhakasywi., 2010. **Pengaruh ukuran zona resirkulasi terhadap sifat trasport separated-reattached flow dengan eksitasi eksternal**. Palembang : Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Ikhwan. **Sudden Expantion**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Jongebloed, Luke., 2008. **Numerical Study using FLUENT of the Separation and Reattachment Point for Backward Facing Step Flow**. Renselear Polytechnic Institute Hartford, Connecticut.
- Kim, Young. dan Jae, 2005. **Comparison of near-wall treatment methods for high Reynold number Backward facing step flow**. USA: School of

Mechanical, Aerospace Engineering and Chemical Engineering ,Oklahoma State University, Stillwater.

Lima, R.C., Andrade, C.R., 2008. **Numerical study of three recirculation zones in the unilateral sudden expansion flow**. International Communication in heat and mass transfer.

Driver, D. M., seegmiller, H. L., 1985. **Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent channel flow**. NASA Ames Research center, Moffett field, California.

Wijanarko, Wahyu. 2005, “**Separasi dan Reattachment Aliran dibelakang Gundukan Bump setengah Lingkaran, Segitiga, dan persegi panjang**”. Laporan Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

## BIODATA PENULIS



Dody Rahmad Tuesa lahir di Batam pada tanggal 17 februari tahun 1991. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan bapak Irgafendi dan ibu Eli Deswita. Penulis memulai pendidikan formal di SD 11 Koto Panjang. Setelah lulus pada tahun 2003 penulis melanjutkan di MTsN Batusangkar dan kemudian melanjutkan ke SMA 1 Batusangkar pada tahun 2006. Pada tahun 2009 menulis menyelesaikan studi tingkat menengah dan melanjutkan pendidikan pada program diploma jurusan teknik mesin Politeknik Negeri Padang melalui jalur PMDK. Selama menempuh program diploma, penulis mengambil bidang studi *Maintenance*. Setelah menyelesaikan program diploma, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang strata 1 di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya dengan bidang studi Rekayasa Konversi Energi khususnya pada laboratorium Mekanika Fluida.